

Universitat de Lleida

Estudio de la relación estructura-propiedad- proceso en cinco variedades de patata (*Solanum tuberosum*) durante el proceso de fritura

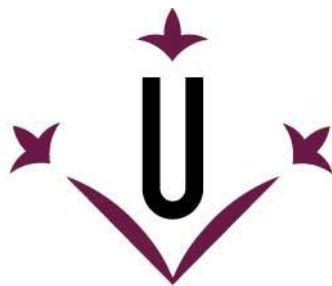
Jimmy Frank Oblitas Cruz

<http://hdl.handle.net/10803/689704>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Lleida

TESI DOCTORAL

**Estudio de la relación estructura-propiedad-
proceso en cinco variedades de patata
(*Solanum tuberosum*) durante el proceso de
fritura**

Jimmy Frank Oblitas Cruz

Memòria presentada per optar al grau de Doctor per la Universitat de
Lleida

Programa de Doctorat en Ciència i Tecnologia Agrària i Alimentària

Director

Dr. Alberto Ibarz Ribas

Dr. Wilson Manuel Castro Silupu

2023



**UNIVERSIDAD DE LLEIDA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Tesis Doctoral

**Estudio de la relación estructura-propiedad-proceso en cinco variedades de patata
(*Solanum tuberosum*) durante el proceso de fritura**

Memoria Presentada Por Jimmy Frank Oblitas Cruz, para optar al grado de doctor por la
Universidad de Lleida.

Esta tesis doctoral ha sido realizada en el Departamento de Tecnología de Alimentos de
la Universidad de Lleida, siendo dirigida por el Dr. Albert Ibarz Ribas (TECAL-UdL) y
el Dr. Wilson Manuel Castro Silupu

El Doctorando

Jimmy Frank Oblitas Cruz

El director,
Dr. Albert Ibarz Ribas
Departamento de Tecnología de Alimentos
(Universidad de Lleida)

El director,
Dr. Wilson Castro Silupu
Departamento de Tecnología de Alimentos
(Universidad Nacional de Frontera)

Resumen

Las propiedades de los alimentos están en función de su estructura y los cambios generados por el procesamiento. Sin embargo, resulta imposible predecir las alteraciones que sufre un alimento a lo largo de la cadena de producción; más si se desconocen cómo se encuentran relacionadas las propiedades y la estructura de un alimento. Por tanto, es necesario desarrollar modelos capaces de predecir dichos comportamientos a lo largo de los procesos de producción.

Estos nuevos modelos deben ser capaces de predecir los cambios en las propiedades del alimento debido a que utilizan relaciones simplificadas y no tienen en cuenta el efecto del proceso sobre la estructura y sobre las propiedades macroscópicas.

Conscientes de este hecho, la presente tesis genera una propuesta con el interés de aportar avances en el conocimiento e interpretación de las relaciones estructura-propiedad-proceso de tejidos vegetales en cinco variedades de patata (variedad Única, variedad Libertena, variedad Yungay, variedad Amarilis y variedad Huevo de Indio). La investigación tuvo como objetivo identificar y analizar las características microestructurales de 5 variedades de patata (*Solanum tuberosum*) en material fresco y en un proceso de fritura usando un arreglo factorial de temperatura (170 – 180 – 190)°C y tiempo (1.0 – 2.5 – 4.0) minutos, se midió dos tipos de características, las primeras de tipo microestructural (área, perímetro, longitud de eje mayor, longitud de eje menor, redondez, elongación y compactación) y la segunda de tipo fisicoquímico (L*, a*, b*, ΔE , concentración de acrilamida, porcentaje de grasa, porcentaje de humedad y textura).

Para ello se implementó un software de caracterización microestructural de patata, desarrollando algoritmos para el procesamiento y análisis de imágenes y para

la clasificación de características estructurales con el software Matlab (versión 2019a), obteniendo como indicadores la distribución estadística de los parámetros de tamaño y forma de cada uno de los elementos estructurales del tejido vegetal en estudio. Se generó los histogramas de los parámetros de compactación, elongación, redondez, longitud de eje mayor, longitud de eje menor, perímetro y áreas celulares para los valores de las patatas fritas de las variedades estudiadas, donde se pudo observar que el tamaño y forma de las curvas es similar para los parámetros de área, perímetro, longitud de eje mayor, longitud de eje menor y compactación.

Se evaluó el efecto sobre las características microestructurales en función a variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura donde se determinó que la variedad de patata es la que ejerce un mayor efecto significativo en los parámetros microestructurales de área, perímetro, longitud de eje mayor, longitud de eje menor, redondez, y compactación ($p < 0.05$). El tiempo es la segunda variable con un elevado efecto, siendo significativo ($p < 0.05$) para los parámetros microestructurales de área, perímetro, longitud de eje mayor, longitud de eje menor y compactación. Finalmente, la temperatura solo ejerce un efecto significativo ($p < 0.05$) en los parámetros de redondez y elongación. Los coeficientes de determinación (R^2) para las respuestas área, perímetro, longitud de eje mayor, longitud de eje menor, redondez, elongación y compactación son 73.1%, 73.9%, 73.4%, 71.8%, 71.3%, 77.1% y 81.3% respectivamente.

De la misma forma se evaluó el efecto de las variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura sobre las características fisicoquímicas, encontrándose los coeficientes de determinación (R^2) para las respuestas L^* , a^* , b^* , ΔE , acrilamida, grasa y humedad son 76.13%, 86.9%, 82.5%, 78.3%, 94.2%, 96.4% y 98.6% respectivamente. Los valores son bastante altos para las superficies de respuesta e

indicaron que los modelos cuadráticos ajustados representaron valores en el rango de 71,1% al 81.3% de la varianza en los datos experimentales, que resultaron ser significativos.

Para observar la relación entre los parámetros microestructurales y fisicoquímicos se usó una correlación de Pearson donde se observó que las correlaciones entre las variables fisicoquímicas evaluadas generan correlaciones de media a fuerte, de la misma forma sucede entre las variables del tipo microestructural. Pero al evaluar las correlaciones entre variables fisicoquímicas y microestructurales se pudo encontrar que en la mayoría alcanzan valores bajos y medios de correlación, siendo la variable elongación la que menos correlación tiene con variables del tipo fisicoquímico y las variables de longitud de eje mayor, longitud de eje menor, perímetro y áreas celulares los que tienen una mayor correlación lineal con las variables fisicoquímicas.

Finalmente, se realizó una espectroscopía Raman con el objetivo de evaluar la presencia de aceite y su influencia en los cambios del proceso de fritura, encontrando que el contenido de aceite dentro del núcleo y la corteza de la patata frita depende de la variedad de la patata.

Resum

Les propietats dels aliments estan en funció de la seva estructura i els canvis generats pel processament. No obstant això, resulta impossible predir les alteracions que sofreix un aliment al llarg de la cadena de producció; més si es desconeixen com es troben relacionades les propietats i l'estructura d'un aliment. Per tant, és necessari desenvolupar models capaços de predir aquests comportaments al llarg dels processos de producció.

Aquests nous models han de ser capaços de predir els canvis en les propietats de l'aliment pel fet que utilitzen relacions simplificades i no tenen en compte l'efecte del procés sobre l'estructura i sobre les propietats macroscòpiques.

Conscients d'aquest fet, la present tesi genera una proposta amb l'interès d'aportar avanços en el coneixement i interpretació de les relacions estructura-propietat-procés de teixits vegetals en cinc varietats de patata (varietat Única, varietat Liberteña, varietat Yungay, varietat Amarilis i varietat Huevo de Indio).

La recerca va tenir com a objectiu identificar i analitzar les característiques microestructurals de 5 varietats de patata (*Solanum tuberosum*) en material fresc i en un procés de fritada usant un arranament factorial de temperatura (170 – 180 – 190)°C i temps (1.0 – 2.5 – 4.0) minuts, es va mesurar dos tipus de característiques, les primeres de tipus microestructural (àrea, perímetre, longitud d'eix major, longitud d'eix menor, rodonesa, elongació i compactació) i la segona de tipus fisicoquímic (L^* , a^* , b^* , ΔE , concentració d'acrilamida, percentatge de greix, percentatge d'humitat i textura).

Per a això, es va implementar un programari de caracterització microestructural de patata, desenvolupant algorismes per al processament i anàlisi d'imatges i per a la classificació de característiques estructurals amb el programari Matlab (versió 2019a),

obtenint com a indicadors la distribució estadística dels paràmetres de grandària i forma de cadascun dels elements estructurals del teixit vegetal en estudi. Es va generar els histogrames dels paràmetres de compactació, elongació, rodonesa, longitud d'eix major, longitud d'eix menor, perímetre i àrees cel·lulars per als valors de les patates fregides de les varietats estudiades, on es va poder observar que la grandària i forma de les corbes és similar per als paràmetres d'àrea, perímetre, longitud d'eix major, longitud d'eix menor i compactació.

Es va avaluar l'efecte sobre les característiques microestructurals en funció de varietats de patata, temperatura i temps de fritada, on es va determinar que la varietat de patata és la que exerceix un major efecte significatiu en els paràmetres microestructurals d'àrea, perímetre, longitud d'eix major, longitud d'eix menor, rodonesa, i compactació ($p < 0.05$). El temps és la segona variable amb un elevat efecte, sent significatiu ($p < 0.05$) per als paràmetres microestructurals d'àrea, perímetre, longitud d'eix major, longitud d'eix menor i compactació. Finalment, la temperatura només exerceix un efecte significatiu ($p < 0.05$) en els paràmetres de rodonesa i elongació. Els coeficients de determinació (R^2) per a les respostes àrea, perímetre, longitud d'eix major, longitud d'eix menor, rodonesa, elongació i compactació són 73.1%, 73.9%, 73.4%, 71.8%, 71.3%, 77.1% i 81.3%, respectivament.

De la mateixa forma es va avaluar l'efecte de les varietats de patata, temperatura i temps de fritada sobre les característiques fisicoquímiques, trobant-se els coeficients de determinació (R^2) per a les respostes L^* , a^* , b^* , ΔE , acrilamida, greix i humitat són 76.13%, 86.9%, 82.5%, 78.3%, 94.2%, 96.4% i 98.6%, respectivament. Els valors són bastant alts per a les superfícies de resposta i van indicar que els models quadràtics ajustats van representar valors en el rang de 71,1% al 81,3% de la variància en les dades experimentals, que van resultar ser significatius.

Per a observar la relació entre els paràmetres microestructurals i fisicoquímics es va utilitzar una correlació de Pearson, on s'observa que les correlacions entre les variables fisicoquímiques avaluades generen correlacions de mitjana a forta, de la mateixa forma succeeix entre les variables del tipus microestructural. Però, en avaluar les correlacions entre variables fisicoquímiques i microestructurals es pot trobar que en la majoria s'aconsegueixen valors baixos i mitjans de correlació, sent la variable elongació la que menys correlació té amb variables del tipus fisicoquímic i les variables de longitud d'eix major, longitud d'eix menor, perímetre i àrees cel·lulars els que tenen una major correlació lineal amb les variables fisicoquímiques.

Finalment, es va realitzar una espectroscòpia Raman amb l'objectiu d'avaluar la presència d'oli i la seva influència en els canvis del procés de fritada, trobant que el contingut d'oli dins del nucli i l'escorça de la patata fregida depèn de la varietat de la patata.

Abstract

The properties of foods depend on their structure and the changes generated by processing. However, it is impossible to predict the alterations that a food undergoes along the production chain, even more so if the relationship between the properties and structure of a food is unknown. Therefore, it is necessary to develop models to predict these behaviors throughout the production process.

These new models must be able to predict changes in food properties because they use simplified relationships and do not consider the effect of the process on the structure and macroscopic properties.

Being aware of this fact, this thesis proposes to contribute to the knowledge and interpretation of the structure-property-process relationships of plant tissues in five potato varieties (Única, Libertena, Yungay, Amarilis, and Huevo de Indio). The objective of the research was to identify and analyze the microstructural characteristics of 5 varieties of potato (*Solanum tuberosum*) in fresh material and a frying process using a factorial arrangement of temperature (170 - 180 - 190°C) and time (1.0 - 2.5 - 4.0 minutes). Two types of characteristics were measured: the first of microstructural type (area, perimeter, major axis length, minor axis length, roundness, elongation, and compaction); and the second of physicochemical type (L^* , a^* , b^* , ΔE , acrylamide concentration, fat percentage, moisture percentage, and texture).

For this purpose, potato microstructural characterization software was implemented, developing algorithms for image processing and analysis, and for the classification of structural characteristics with Matlab software (version 2019a), obtaining the statistical distribution of the size and shape parameters of each of the structural elements of the plant tissue under study as indicators. Histograms of the

parameters of compaction, elongation, roundness, major axis length, minor axis length, perimeter, and cell areas were generated for the values of the fries of the varieties studied, where it could be observed that the size and shape of the curves are similar for the parameters of area, perimeter, major axis length, minor axis length, and compaction.

The effect on the microstructural characteristics was evaluated according to potato variety, temperature, and frying time, where it was determined that the potato variety has the greatest significant effect on the microstructural parameters of area, perimeter, major axis length, minor axis length, roundness, and compaction ($p < 0.05$). Time is the second variable with a high effect, being significant ($p < 0.05$) for the microstructural parameters of area, perimeter, major axis length, minor axis length, and compaction. Finally, the temperature only has a significant effect ($p < 0.05$) on the parameters of roundness and elongation. The coefficients of determination (R^2) for area, perimeter, major axis length, minor axis length, roundness, elongation, and compaction responses are 73.1%, 73.9%, 73.4%, 71.8%, 71.3%, 77.1%, and 81.3%, respectively.

In the same way, the effect of potato varieties, temperature, and frying time on physicochemical characteristics was evaluated, finding that the coefficients of determination (R^2) for L^* , a^* , b^* , ΔE , acrylamide, fat, and moisture responses are: 76.13%, 86.9%, 82.5%, 78.3%, 94.2%, 96.4%, and 98.6%, respectively. The values are quite high for the response surfaces and indicate that the fitted quadratic models accounted for values ranging from 71.1% to 81.3% of the variance in the significant experimental data.

A Pearson correlation was used to observe the relationship between the microstructural and physicochemical parameters, where medium to strong correlations

were found to be generated between the physicochemical variables evaluated. The same happens between the microstructural variables, but, when evaluating the correlations between physicochemical and microstructural variables, it was found that most of them reach low and medium correlation values, being the elongation variable the least correlated with physicochemical variables; and the major axis length, minor axis length, perimeter, and cellular areas variables, the ones that have a higher linear correlation with physicochemical variables.

Finally, Raman spectroscopy was performed to evaluate the presence of oil and its influence on the changes in the frying process, revealing that oil content within the core and rind of the fried potato depends on the potato variety.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	17
INTRODUCCIÓN	17
1. Introducción	18
1. Fritura.....	18
1.1. Definición.....	18
1.2. Proceso de fritura por inmersión en aceite	19
1.2.1. Transmisión de calor	19
1.2.2. Transferencia de materia	21
1.3. Parámetros de Fritura	24
1.3.1. Temperatura de fritura.....	24
1.3.2. Tiempo de fritura.....	25
1.4. Factores del alimento durante la fritura de alimentos.	25
1.5. Efecto de la fritura sobre las propiedades fisicoquímicas de los alimentos fritos	26
1.5.1. Contenido de humedad.....	26
1.5.2. Contenido de aceite	27
1.5.3. Contenido de acrilamida.....	28
1.5.4. Textura	29
1.5.5. Color.....	30
1.6. Relaciones estructura – propiedad – proceso	32
1.6.1. Análisis de la estructura en tejidos vegetales	32
1.6.2. Cambios estructurales debidos a procesos de transformación	34
1.7. Micrografías	35
1.7.1. Microscopia de barrido de electrones.....	36
1.8. Espectroscopía Raman	36
1.9. Patatas peruanas	37
1.10. Microestructura de patata	42
1.11. Determinación de Parámetros microestructurales.....	46
2. Objetivos y plan de trabajo.....	52
2.1. Justificación e interés de la tesis doctoral	52
2.2. Objetivos	56
2.3. Plan de trabajo.....	57
Capítulo 3	59
Materiales y Métodos.....	59
3. Materiales y Métodos	60
3.1. Unidad de análisis, población y muestra de estudio.....	60

3.2. Proceso de Fritura.....	63
3.3. Obtención de micrografías en microscopio óptico.....	65
3.4. Implementación y caracterización microestructural de patata	66
3.5. Análisis de color.....	66
3.6. Textura	67
3.7. Determinación de grasa.....	67
3.8. Determinación de humedad.....	68
3.9. Determinación de acrilamidas	68
3.10. Determinación de micrografías SEM.....	68
3.11. Toma de espectros RAMAN.....	69
3.12. Técnicas de procesamiento y análisis de información	70
Capítulo 4.....	71
Desarrollo de sistema para medición de Microestructura	71
4. Desarrollo de sistema para medición de microestructura.....	72
4.1. Desarrollo de software	73
4.1.1. Pre – procesamiento y Desarrollo de algoritmos.....	73
4.1.2. Procesamiento.	74
4.1.3. Clasificación.....	76
4.1.4. Análisis estadístico.....	77
4.2. Validación de software.....	80
Capítulo 5.....	85
Resultados y discusión	85
5. Resultados y discusiones.....	86
5.1. Características microestructurales de variedades de patata.....	86
5.2. Efecto sobre las características microestructurales en función a variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura.....	94
5.3. Observación de la microestructura con Microscopía electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope).....	109
5.4. Efecto de las variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura sobre las características fisicoquímicas.	115
5.5. Relación estructura-propiedad-proceso.....	126
5.6. Efecto de las variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura sobre las características espectrales usando análisis RAMAN.	131
Capítulo 6.....	142
Conclusiones	143
Referencias.....	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de transmisión de calor y de materia durante la fritura	19
Figura 2. Micrografía óptica (a) y electrónica de barrido (b) de tejido fresco de una patata variedad única que muestra la estructura celular y los gránulos de almidón	45
Figura 3. Variedades de patata usadas en la investigación	62
Figura 4. Representación esquemática de las regiones del núcleo y de la corteza de una patata frita con forma de prisma rectangular.	64
Figura 5. Parámetros de tamaño y forma para el análisis microestructural	66
Figura 6. Parámetros morfológicos	75
Figura 7. Esquema general de aplicación CNN	76
Figura 8. Esquema de adaptación RNC Alexnet.....	77
Figura 9. Matriz de confusión	77
Figura 10. Esquema general de la aplicación: módulos y rutinas, funciones y guías más importantes.....	79
Figura 11. Resultados del procesamiento de una micrografía.....	80
Figura 12. Imágenes de a) células b) espacios	81
Figura 13. Precisión (a) y Error (b) en el entrenamiento de RNC	83
Figura 14. Estadísticos de la identificación usando RNC	84
Figura 15. Imágenes de células de patata.....	87
Figura 16. Histogramas de frecuencia y valores promedio (normalizados).....	89
Figura 17. Comparación de parámetros microestructurales entre variedades de patata.....	93
Figura 18. Gráfico de Pareto de efecto estandarizado y superficies de respuesta	97
Figura 19. Gráfico de efectos principales para patata variedad Amarilis	102
Figura 20. Gráfico de efectos principales para patata variedad Unica	103
Figura 21. Gráfico de efectos principales para patata variedad Huevo de Indio.....	104
Figura 22. Gráfico de efectos principales para patata variedad Yungay	105
Figura 23. Gráfico de efectos principales para patata variedad Liberteña	106
Figura 24. Micrografía SEM correspondiente a las muestras de patatas sin freír	110
Figura 25. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Única.....	111
Figura 26. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Yungay.....	111
Figura 27. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Huevo de Indio	112

Figura 28. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Libertena	112
Figura 29. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Amarilis	113
Figura 30. Gráfico de Pareto de efecto estandarizado y superficies de respuesta para parámetros fisicoquímicos	119
Figura 31. Correlación de parámetros microestructurales vs parámetros fisicoquímicos	129
Figura 32. Factores de Pearson para la correlación de parámetros microestructurales vs parámetros fisicoquímicos.....	130
Figura 33. Perfil Raman de aceite	132
Figura 34. Espectros de corrimiento Raman de las 5 variedades de patatas no fritas	132
Figura 35. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata Única a diferentes temperaturas de fritura y tiempo.	135
Figura 36. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata Yungay a diferentes temperaturas de fritura y tiempo.	136
Figura 37. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata frita Huevo de Indio a diferentes temperaturas de fritura y tiempo.....	137
Figura 38. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata frita Libertena a diferentes temperaturas de fritura y tiempo.	138
Figura 39. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata Amarilis a diferentes temperaturas de fritura y tiempo. L.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de variedades de patata.....	61
Tabla 2. Parámetros de procesos de fritura	63
Tabla 3. Variables respuestas	65
Tabla 4. Información set células / espacios intercelulares.....	82
Tabla 5. Valores descriptivos de los parámetros microestructurales por variedad de patata	90
Tabla 6. Diseño experimental y valores microestructurales obtenidos.	95
Tabla 7. Valores de R^2 y coeficientes para los modelos de predicción en parámetros microestructurales	100
Tabla 8. Diseño experimental y valores fisicoquímicos obtenidos.	117
Tabla 9. Valores de R^2 y coeficientes para los modelos de predicción fisicoquímica	121

Capítulo 1
INTRODUCCIÓN

1. Fritura

1.1. Definición

La fritura es una de las operaciones unitarias convencionales y más comunes involucradas en la preparación de una variedad de alimentos fritos siendo los más comunes las patatas fritas, bocadillos extruidos de pollo frito entre otros, esta tecnología implica cocinar alimentos sumergiéndolos en aceite o grasa comestible caliente a una temperatura más alta que el punto de ebullición del agua generando cambios en el sabor y textura del producto (Bouchon, 2009).

La fritura es un proceso rápido en el que se pueden utilizar transferencias simultáneas de calor y materia como lo realiza la operación de secado. La fritura es un proceso con transferencia simultánea de calor y materia y también es un proceso complejo debido a dos operaciones de transferencia de masa que tienen lugar en direcciones opuestas entre el material (producto) y el medio de calentamiento (aceite) cuando se fríe. Durante este proceso el alimento sometido a fritura sufre una transformación física y química en un rango de temperatura alto de aproximadamente 140° C a 180° C (Asokapandian et al., 2020). La fritura también proporciona deshidratación a la cocción, con gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, aromatización y coloración mediante reacciones de Maillard y finalmente captación de aceite.

1.2. Proceso de fritura por inmersión en aceite

La fritura es un proceso complejo con transferencia de calor y materia entre el producto y el aceite de fritura. La pérdida de humedad, la adsorción de aceite y la formación de costras se producen en la región de la superficie de los productos fritos. La evaporación del agua es rápida, este proceso está restringido por la formación de una costra gruesa; por lo que la presión comienza a acumularse dentro del producto debido a la acumulación de exceso de vapor, este fenómeno da como resultado la formación de grietas en la costra las cuales actúan como conductos para la entrada de aceite en el producto (Oke et al., 2018).

1.2.1. Transferencia de calor

En el proceso de fritura tanto la transmisión de calor por conducción como por convección son posibles y este nivel depende en gran medida del calor específico, la densidad, la difusividad y la conductividad térmica, un esquema de este proceso se observa en la figura 1.

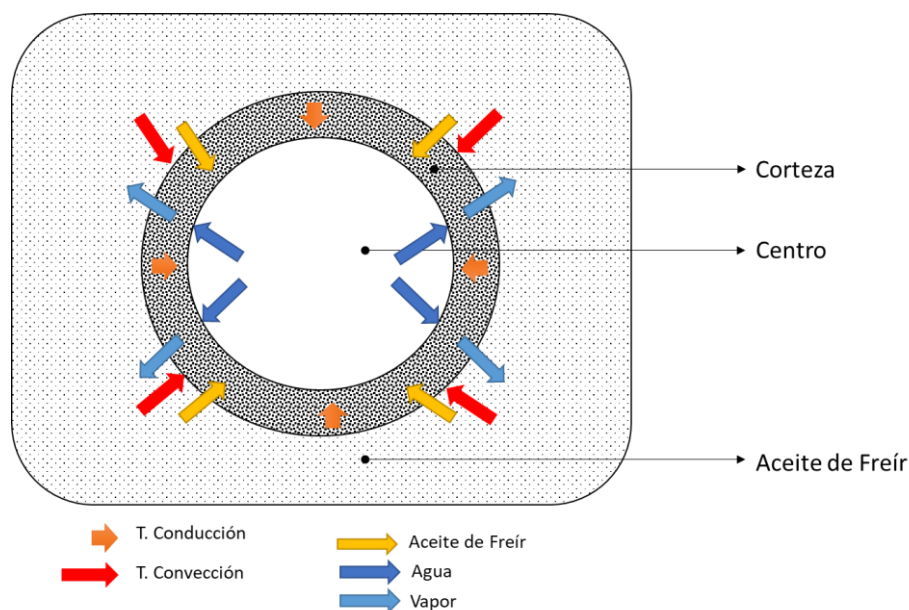


Figura 1. Mecanismo de transmisión de calor y de materia durante la fritura (Oke et al., 2018)

La transmisión de calor por conducción ocurre dentro de los alimentos, mientras que la transmisión de calor por convección ocurre entre los alimentos y el aceite para freír. La evaporación del agua es rápida en las etapas iniciales de fritura y el agua que se escapa del producto llega a la superficie.

El agua que se escapa entra en contacto con el aceite de fritura y forma burbujas que se transfieren vigorosamente por todo el aceite creando turbulencias (Alvis et al., 2009). Por lo tanto, el agua burbujeante en la superficie influye en el coeficiente de transmisión de calor a través del aumento de la turbulencia. La cantidad de burbujas de vapor de agua que escapan de los alimentos disminuye con el aumento del tiempo de fritura debido a la disminución de la cantidad de humedad restante dentro del producto (Asokapandian et al., 2020). La transmisión de calor durante la fritura profunda se puede dividir en cuatro fases:

- Calentamiento inicial: La temperatura del producto aumenta hasta el punto de ebullición del agua durante los primeros segundos de fritura. Es la etapa donde comienza la vaporización de la humedad del producto. Esta fase también se considera muy corta y se pierde una cantidad muy insignificante de agua del producto.
- Ebullición superficial: durante esta fase, la humedad superficial comienza a evaporarse y forma una costra en la superficie del producto. También se produce un aumento en el coeficiente de transmisión de calor superficial durante esta fase.
- Velocidad descendente: etapa en la que se produce la evaporación de la humedad a granel y la humedad de la región central se mueve hacia la parte

exterior del alimento. También se producen cambios físico-térmicos como la desnaturalización de las proteínas, la gelatinización del almidón, la cocción interna de los alimentos y el espesamiento de la corteza durante esta fase. Esta fase se considera la más larga y durante este período, el núcleo central del producto se acerca a la temperatura de ebullición del agua.

- Punto final de la burbuja: esta es la etapa final de la fritura, donde las tasas de eliminación de humedad y la burbuja de vapor de agua que escapa de la superficie del producto también se llevan a cabo.

1.2.2. Transferencia de materia

Durante la fritura, tienen lugar dos tipos de transferencia de materia, como la transferencia de humedad y la transferencia de aceite. Cuando comienza el proceso de fritura y también cuando la temperatura del aceite de fritura es baja, la transferencia de humedad se produce en forma de movimiento de líquido. El modo líquido de transferencia de humedad es más lento que el modo vapor (Devi et al., 2020). La pérdida de humedad del producto se considera un proceso de difusión controlada y puede explicarse por la segunda ley de difusión de Fick.

Al inicio del proceso de fritura la transferencia de humedad ocurre desde la superficie del producto y luego en la interfaz entre la capa seca y la capa húmeda del producto donde la fuerza impulsora para la transferencia de humedad se debe al gradiente de difusión entre la capa seca y la capa húmeda del producto, este gradiente de presión es creado por la evaporación de la humedad interna. A medida que avanza la fritura, debido a la disminución del contenido de humedad, también disminuye la cantidad de pérdida de humedad

del producto. La tasa de pérdida de humedad es rápida durante los primeros 60 segundos de fritura y luego se reduce considerable y finalmente alcanza una constante al final de la fritura (Lalam et al., 2013).

De acuerdo a Vitrac et al., (2000) la pérdida de humedad durante la fritura profunda se puede clasificar en tres períodos diferentes:

- Calentamiento del producto hasta el punto de ebullición del agua junto con la evaporación del contenido de humedad superficial.
- Evaporación del agua libre o capilar a una temperatura cercana al punto de ebullición del agua.
- Aumento de la temperatura del producto a la temperatura del aceite de fritura junto con velocidades de secado reducidas.

En el proceso de fritura también se da la transferencia del medio de fritura (aceite) al producto, en este proceso la adsorción de aceite en el alimento está muy influenciada por la temperatura del aceite, el período de fritura, el contenido de humedad de la superficie, el área de la superficie del producto y la presión durante la fritura (Fellows, 2017). La adsorción de aceite podría caracterizarse por dos fenómenos, el reemplazo de la humedad y la adsorción durante el enfriamiento de los productos fritos. La cantidad de aceite adsorbido es directamente proporcional a la cantidad de humedad perdida del producto. Una temperatura de fritura más alta generalmente reduce la adsorción de aceite debido a la reducción del tiempo de residencia total en el medio de fritura.

Según Dana & Saguy (2006), el mecanismo de pérdida de humedad y adsorción de aceite durante la fritura se puede clasificar en las siguientes etapas:

- La alta temperatura durante la fritura genera una ebullición violenta del agua contenida en el producto que revienta las paredes celulares y forma poros y huecos capilares.
- El aceite se adsorbe en el producto a través de estos poros y huecos capilares.

La cantidad de aceite adsorbido aumenta con la reducción de la presión interna debido a la pérdida de humedad y el subsiguiente enfriamiento. El aceite que ingresa a los huecos dejados por la pérdida de humedad podría mantener abiertos los capilares al evitar que la estructura se contraiga o colapse. La entrada de aceite de fritura a través de los poros capilares ocurre durante los primeros 20 segundos de fritura. También se encontró que, como resultado de la adhesión y la acción capilar, la adsorción de aceite ocurre principalmente durante el proceso de enfriamiento después de la fritura.

Durante la fritura, parte de la humedad del interior del producto se convierte en vapor y provoca un gradiente de presión. Mientras se genere vapor se evita que el aceite de freír llene los huecos. Por lo tanto, durante el enfriamiento, la presión interna disminuye debido a la condensación y, en consecuencia, crea un efecto de vacío que empuja el aceite hacia el producto (Pedreschi, 2012).

1.3. Parámetros de fritura

1.3.1. Temperatura de fritura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes que se controla durante la fritura para garantizar la buena calidad de los alimentos fritos. La desviación en la temperatura de fritura está asociada con la degradación del aceite, mayor formación de tensioactivos, oscurecimiento del producto y adsorción de aceite.

Los investigadores han informado resultados contrastantes con respecto a la influencia de la temperatura de fritura en la adsorción de aceite. (Kita & Lisińska, 2005) informaron que la temperatura influyó tanto en el contenido de grasa como en la textura del producto donde el aumento de la temperatura de fritura disminuyó la adsorción de grasa y la dureza de las patatas fritas.

Por el contrario, la investigación de Vitrac et al. (2000) muestra mayores niveles de adsorción de aceite a una temperatura de fritura más baja. Esto podría deberse a la razón de que, a una temperatura de fritura más baja, el tiempo de residencia del producto tiende a ser alto, lo que mejora la adsorción de aceite. Además, una temperatura de fritura más alta desencadenó el proceso de deshidratación y la formación de costra inmediata actuó como una barrera para la adsorción de aceite, lo que evitó el escape de humedad del producto alimenticio y, posteriormente, dificultó la adsorción de aceite.

Pedreschi (2012) informó resultados similares donde a temperaturas de fritura de entre 150° y 180° C, no se observó una adsorción significativa de aceite, pero se encontró que el aumento de la temperatura de fritura conduce a una disminución de la adsorción de aceite.

1.3.2. Tiempo de fritura

El tiempo y la temperatura de fritura afectan la cantidad de calor transferido al producto y, por lo tanto, ambos están relacionados. Si el tiempo de fritura supera el óptimo a temperatura constante, el producto tiende a tener una mayor adsorción de aceite. Se encontró que el contenido de aceite era el doble de la raíz cuadrada del tiempo de fritura durante la fritura de la patata, esto lo plantearon Gamble et al. (1987) donde mostraron que el límite elástico de la corteza se vio afectado por el tiempo de prueba y el módulo de deformabilidad de la materia prima, asimismo encontraron que la adsorción de aceite aumenta con el aumento del tiempo de fritura en alimentos recubiertos hasta alcanzar el equilibrio.

1.4. Factores del alimento durante la fritura de alimentos.

La forma y el tamaño de un alimento influyen mucho en la cantidad de aceite adsorbido durante la fritura. Al ser un fenómeno de superficie, la adsorción de aceite se correlaciona negativamente con el espesor del producto, ya que la mayor parte del aceite de fritura permanece en la superficie.

Las propiedades estructurales de los alimentos también influyen en la adsorción de aceite porque la mayor parte del aceite de freír penetra a través de los poros capilares de la corteza. El lugar privilegiado para la adsorción de aceite son las células rotas durante el corte. A medida que la superficie de corte tiene más rugosidad y contacto con el aceite, aumenta la adsorción de aceite (Ziaifar et al., 2008).

La composición inicial del producto también es un parámetro importante que influye en la cantidad de captación de aceite luego de finalizar

el proceso de fritura. El factor principal que impacta en la adsorción de aceite durante la fritura es la humedad inicial y el contenido de sólidos en el producto. Los productos como los cilindros de plátano, las patatas fritas exhiben un contenido de agua intermedio y también indican que el producto con un alto contenido de humedad inicial conduce a una mayor adsorción de aceite en productos fritos.

Yamsaengsung & Moreira (2002), muestran una correlación entre la pérdida de agua y la adsorción de aceite, debido a que el aumento en el contenido de humedad inicial de la harina de masa aumentó de manera significativa el contenido de aceite final de los chips de tortilla. El autor también infirió que la distribución del tamaño de los poros que se desarrolló durante la fritura fue la principal causa de la adsorción de aceite durante el enfriamiento. La estructura altamente porosa del producto frito se debió principalmente a una gran pérdida de humedad o un alto nivel de contenido de humedad inicial.

1.5. Efecto de la fritura sobre las propiedades fisicoquímicas de los alimentos fritos

1.5.1. Contenido de humedad

Por lo general, la adsorción de aceite tiene lugar como resultado de la eliminación de la humedad de los productos alimenticios. Se ha informado que, si la adsorción de grasa es alta, se debe a un mayor contenido de humedad inicial (Pedreschi, 2012). Si el contenido de humedad inicial es menor, disminuiría el volumen interno del alimento que podría estar ocupado por el aceite durante la fritura y también acortaría el tiempo de fritura.

La humedad sale de los productos alimenticios por difusión. La difusión efectiva del agua a través de la corteza es un parámetro importante que afecta la evaporación del agua y la adsorción de aceite. La relación de adsorción de aceite se utilizó para expresar la relación en peso entre la adsorción de aceite y la pérdida de humedad (Pinthus et al., 1995). Se descubrió que este parámetro de humedad es fundamental para evaluar la eficacia de la reducción de la adsorción de aceite durante la fritura.

1.5.2. Contenido de aceite

La comprensión integral del mecanismo de adsorción de aceite es básica y vital para controlar el contenido de aceite de los alimentos fritos. Los mecanismos de adsorción de aceite reconocidos incluyen la sustitución del agua, el efecto de condensación, el efecto capilar y el efecto tensioactivo. La propuesta de sustitución de agua se basa en que los poros y grietas internas en los alimentos fritos formados por la evaporación del agua durante el proceso de fritura proporcionan una vía para que el aceite entre en los alimentos (Troncoso & Pedreschi, 2009). Algunos estudios incluso presentan que el volumen de aceite adsorbido es igual al volumen de agua evaporada de la muestra (Y. Liu et al., 2021).

El efecto de condensación ocurre en el proceso de enfriamiento después de que los productos fritos se sacan del aceite para freír, durante el cual la temperatura disminuye. La condensación del vapor y la disminución de la presión interna obligan al aceite superficial a ingresar al interior de los alimentos fritos (Başaran & Turk, 2021).

Estudios encontraron que la presión capilar es una fuerza impulsora importante para la adsorción de aceite, y la adsorción de aceite es causada por

el efecto capilar a través de la porosidad formada durante la fritura (E. J. Pinthus et al., 1993). Miranda & Aguilera (2006) propusieron que el escape de agua provoca una reacción de hidrólisis y la ruptura del enlace químico entre la glicerina y el ácido graso y, por lo tanto, forma tensioactivos de monoglicérido y diglicérido. Los canales para el aceite que ingresa a la muestra incluyen no solo macroporos y grietas, sino también algunos capilares, en consecuencia, el proceso de adsorción de aceite puede ser la coexistencia e interacción de múltiples mecanismos.

Por lo general se cree que el contenido de aceite aumenta con el aumento del tiempo de fritura, y el efecto de la temperatura de fritura en el contenido de aceite esto se debe a la diferencia de propiedades de la materia prima. Como aspecto importante de las propiedades de la estructura del material, la estructura de los poros tiene una influencia importante en la adsorción de aceite. Las propiedades macroscópicas (densidad aparente, porosidad, volumen de poro, área de superficie específica, etc.) y las caracterizaciones microscópicas (tamaño de poro, distribución del volumen de poro y distribución del número de poro) podrían afectar la adsorción de aceite (Vauvre et al., 2014)

1.5.3. Contenido de acrilamida

La acrilamida (C_3H_5NO) es un compuesto sólido incoloro e inodoro que tiene un punto de fusión de aproximadamente 85 °C, fácilmente soluble en agua, ubicado en el grupo amida, que consiste en la hidratación del acrilonitrilo. La acrilamida se forma en un alto nivel durante el tratamiento térmico (120° C y superior) aplicado a alimentos que son ricos en aminoácidos (Başaran & Turk, 2021). Este proceso conocido como

reacción de Maillard es el principal mecanismo de formación de acrilamida en las patatas fritas (Tareke et al., 2002).

Se han publicado numerosos trabajos en relación con la presencia de acrilamida en los alimentos (Pérez-López et al., 2021). Las autoridades sanitarias de algunos países están determinando la exposición dietética de los consumidores a la acrilamida y recopilando información sobre su toxicología a través de proyectos científicos.

1.5.4. Textura

La mayoría de los atributos de textura de los alimentos se perciben a través de la masticación, un proceso mediante el cual un alimento sólido se rompe, rasga, tritura y muele, se mezcla con saliva para formar un bolo alimenticio que se puede tragar y digerir (J. M. Aguilera, 2005). La textura es una cualidad importante de los productos alimenticios fritos y es la respuesta al cambio estructural de los productos durante el procesamiento térmico y la cocción. La textura de un producto alimenticio se puede evaluar mediante análisis instrumental y evaluación sensorial.

La determinación de la textura mediante examen instrumental es más precisa, más simple y requiere menos tiempo (Chen & Rosenthal, 2015). La dureza es uno de los parámetros que se puede identificar a partir de una curva de perfil de textura y se define como la fuerza a la compresión máxima durante el primer bocado.

Durante la evaluación de la textura en patatas fritas, (Kita et al., 2015) informaron que la textura de las patatas fritas estaba muy influenciada por el tipo de aceite para freír, la temperatura del aceite, el contenido de materia seca de la muestra fresca y el contenido de grasa del producto final. Se infirió que

las patatas fritas de 1,2 mm exhibían una buena textura cuando su dureza estaba entre 25 y 30 y entre 30 y 35 para una muestra de 1,8 mm de espesor.

La gelatinización del almidón de las células internas y la deshidratación, la formación de costras en las patatas fritas es el resultado de cambios en la estructura original del tejido de la patata después de la exposición al aceite caliente. La corteza exterior se endurece con la temperatura acelerada en el caso de las patatas fritas (Pedreschi, 2009).

1.5.5. Color

La apariencia superficial y el color de los alimentos son los primeros parámetros de calidad evaluados por los consumidores y, por lo tanto, son factores críticos para la aceptación del alimento por parte del consumidor. Aunque existen diferentes espacios de color, el más utilizado de estos en la medición del color en los alimentos es el espacio de color $L^*a^*b^*$ debido a la distribución uniforme de los colores, y porque es muy cercano a la percepción humana del color (León et al., 2006). En general, las coordenadas de color son valores escalares obtenidos por integración (o algún tipo de transformación matemática) de las curvas resultantes del producto y de la potencia de la fuente de luz, la curva de reflectancia del objeto y las curvas que representan la base de los colores asociados con el observador estándar (Rivas et al., 2011).

En la industria procesadora de patatas, el punto crítico de la evaluación de la calidad sea el mantenimiento del color satisfactorio de las patatas fritas. El color de las patatas fritas se define en la unidad $L^*a^*b^*$, que es un estándar internacional para medir el color adoptado por la Comisión Internacional de

Iluminación (CIE) en 1976. L^* , a^* y b^* definen la luminancia o luminosidad (0 a 100), los grados de verde a rojo y de azul a amarillo (120 a 120).

Las temperaturas de fritura más bajas generan una tonalidad de dorado claro en la patata, lo que resulta en chips de colores más claros (Pedreschi, 2009). El color del chip es consecuencia del pardeamiento no enzimático asociado con la reacción de Maillard durante la fritura. En patatas estas tonalidades son el resultado de la reacción de los aminoácidos con los azúcares reductores, como D-glucosa, acumulados durante el almacenamiento a baja temperatura. La tecnología de fritura al vacío, que utiliza una temperatura de aceite más baja, puede ayudar a disminuir el efecto de temperaturas más altas en el color de los alimentos fritos. (Garayo & Moreira, 2002) encontraron un L^* más alto a una presión de vacío de 3.115 kPa y una temperatura de fritura de 140° C.

La producción de chips de colores más claros a menudo requiere un tratamiento previo de las patatas en rodajas en el procesamiento. El escaldado es una de las operaciones unitarias más importantes en el procesamiento de vegetales que ayuda a controlar el color del producto final. Los azúcares reductores del tejido de la patata se filtran durante el blanqueamiento que conduce a un color más claro y evita un color oscuro indeseable en las rodajas de patata después de freír. Es difícil controlar el color de los chips porque depende de otros aspectos diferentes al calentamiento, como las condiciones de almacenamiento de la patata, la variedad de patata y la madurez de los tubérculos (Pedreschi, 2012).

1.6. Relaciones estructura – propiedad – proceso

En el alimento la materia y la energía se organiza en estructuras que responden a varios niveles de complejidad e incorporan crecientes niveles de funcionalidad, resultado de la reorganización de estructuras previas menos complejas (Aguilera & Stanley, 1999; Fito et al., 2007) y como consecuencia de dicha organización resultan las propiedades del sistema.

Las relaciones, entre la estructura de un alimento, sus propiedades y funcionalidad, son de fundamental interés en la ingeniería de alimentos como comentan varios autores (Aguilera & Stanley, 1999; Fennema et al., 2008; Fito et al., 2007). Las propiedades finales de los alimentos son el resultado de los cambios sucesivos en la materia prima (composicionales y estructurales), producido como resultado de los fenómenos físicos y químicos acontecidos a lo largo del proceso de transformación (deformaciones y relajaciones de estructura, reacciones enzimáticas, transiciones de fase, etc.).

De esta forma, para un adecuado diseño de productos y procesos alimentarios es necesario conocer y predecir los cambios en la estructura de un alimento a lo largo del proceso de transformación y su relación con los cambios en las propiedades de este.

1.6.1. Análisis de la estructura en tejidos vegetales

El análisis de las estructuras en tejidos vegetales pasa por la caracterización de los elementos estructurales del tejido (células y espacios intercelulares). En este punto se encuentra que los alimentos naturales y procesados pueden parecer uniformes cuando se examinan a escala macroscópica, así, las medidas de propiedades físicas se asumen que son intrínsecamente correspondientes a un material homogéneo. Sin embargo, la

mayoría de las propiedades macroscópicas dependen de las características microscópicas y a esta escala los alimentos pueden lucir algo heterogéneos y anisotrópicos (Aguilera, 2006; Mebatsion et al., 2009), lo cual complica el proceso de análisis y su aplicabilidad en la tecnología de alimentos.

En contraposición a la transcendencia de la tecnología de microestructura en alimentos, su total adopción en la academia ha sido lenta. Las razones para esta gradual adopción pueden ser el alto costo de la instrumentación, la necesidad de aproximaciones multidisciplinarias y la idea que las imágenes solo proveen información subjetiva (Aguilera, 2005). Es así como imágenes de la microestructura (micrografías) son usadas solo como soporte para una descripción cualitativa de la microestructura y complementa la data generada por rigurosos protocolos de muestreo y preparación (Ramírez et al. 2009).

Recientes investigaciones han tratado acerca de la caracterización de los tejidos vegetales tanto frescos como procesados (Dhital et al., 2018; Guedes et al., 2021; Rahman et al., 2018; Zhou et al., 2022), los cuales han basado sus análisis en la caracterización de la microestructura mediante reconocimiento visual de las estructuras y determinación de los parámetros de tamaño y forma.

Sin embargo; aún se requiere de un operador entrenado que discrimine entre los elementos existentes en la microestructura. En este punto se puede considerar el uso de sistemas inteligentes, aplicaciones informáticas de inteligencia artificial. Estas aplicaciones ya son usadas con éxito en la clasificación de frutales de acuerdo al estado de madurez u otros parámetros de calidad y en el pre procesamiento de imágenes (Du & Sun, 2006) y que,

tomando en cuenta su capacidad de auto aprendizaje, podrían ser aplicables al reconocimiento de los distintos elementos estructurales en tejidos vegetales.

Una de las aplicaciones más recientes es la propuesta por (Biswas & Barma, 2020) donde sus resultados muestran que los datos obtenidos del uso de micrografías de células teñidas y analizadas con inteligencia artificial son muy eficientes y podrían enriquecer el dominio del análisis microscópico de células vegetales.

1.6.2. Cambios estructurales debidos a procesos de transformación

La tecnología de alimentos puede ser definida como un intento controlado para preservar, transformar, crear o destruir estructuras que han sido impartidas por la naturaleza o procesado (Parada & Aguilera, 2007).

La mayoría de los procesos de alimentos envuelven transmisión de calor y transferencia de materia en sistemas multifásicos y toman lugar simultáneamente con modificaciones físicas, microestructurales y macroestructurales.

En particular, cuando la materia alimentaria es un sólido poroso como frutas y vegetales, los mecanismos de transferencia de materia son difíciles de clarificar debido a la complejidad de la morfología de los tejidos vegetales. Entonces, algunos intentos de describir estos fenómenos requieren el conocimiento de las propiedades de transporte involucradas y sus cambios también como la compactación y otras modificaciones estructurales a nivel celular (Dhital et al., 2018; Reinheimer, 2012).

La observación de las alteraciones estructurales en tejido vegetal usando microscopía puede incrementar el conocimiento científico de las

modificaciones en el tejido vegetal a través del procesado de alimentos, permitiendo una mejor comprensión de los mecanismos de transferencia de materia. El conocimiento acerca de las relaciones entre la microestructura y la textura pueden ser usadas para optimizar los procesos de producción de alimentos así como para desarrollar nuevos productos con la deseable calidad organoléptica (van der Sman et al., 2018).

1.7. Micrografías

La investigación de microestructura actual tiene como objetivo la comprensión de las relaciones biológicas entre estructura y función a nivel celular y molecular utilizando una amplia variedad de procedimientos preparatorios, como citoquímica, inmunocitoquímica, tinción y análisis de imágenes. Todos estos métodos dependen de una serie de procedimientos básicos que son cruciales para el resultado de los análisis, por ejemplo, procedimientos de fijación, ultramicrotomía y, no menos importante la microscopía (de Assumpção Pereira-da-Silva & Ferri, 2017).

La imagen del microscopio se caracteriza por su riqueza de información. Sin embargo, solo una parte de la información está relacionada con el objeto biológico en sí; otras partes dependen de varios pasos preparatorios y de las características del instrumento. Como consecuencia, las micrografías electrónicas son mucho menos accesibles a la interpretación de lo que parece, el proceso de interpretación de micrografías electrónicas puede dividirse intencionalmente o no en una serie de pasos consecutivos o niveles de análisis, por ejemplo:

- Detección de objetos
- Identificación de artefactos

- Análisis de geometría
- Identificación biológica
- Análisis de la dinámica

1.7.1. Microscopía de barrido de electrones

Un microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM, por Scanning Electron Microscope) es un instrumento para obtener imágenes de topografía y para obtener información material de una muestra conductora utilizando un haz enfocado de electrones de alta energía. El haz de electrones se desvía en un campo magnético y realiza un movimiento de exploración en un patrón de trama para capturar la superficie de las muestras. Para fines de imagen, los fenómenos de interacción del haz de electrones con la muestra, como la emisión de electrones secundarios o los electrones retrodispersados, se detectan y se convierten en valores grises. Un análisis de frecuencia de rayos X revela información sobre el material presente (Schmitt, 2017).

1.8. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es una técnica de espectroscopía vibratoria basada en la interacción fotón-molécula en la región de 400-4000 cm^{-1} del espectro electromagnético. A diferencia del resto de técnicas de espectroscopía vibracional, Raman se basa en medir la fracción de dispersión inelástica de la radiación incidente emitida a través de su interacción con las moléculas vibrantes de la muestra (Arroyo-Cerezo et al., 2021). En la espectroscopía Raman, la muestra se ilumina con un rayo láser monocromático que interactúa con las moléculas de la muestra y origina una

luz dispersa. La luz dispersada que tiene una frecuencia diferente a la de la luz incidente (dispersión inelástica) se usa para construir un espectro Raman.

Un espectro Raman se presenta como un cambio de intensidad versus longitud de onda muy similar a sus contrapartes infrarrojas (IR), aunque es más simple ya que las bandas de combinación y diferencia que se observan comúnmente en NIR e IR son raras (Bumrah & Sharma, 2016).

Las técnicas espectrofotométricas están siendo muy usadas en el campo de los alimentos sobre todo para poder analizar la calidad de los productos, (Sanchez et al., 2020) en su revisión informa el conocimiento actual sobre las aplicaciones recientes de imágenes y espectroscopía para inspeccionar la calidad y la seguridad de los tubérculos de batata y patata cruda. Junto con ello se han venido ya usando la espectroscopía Raman en patatas fritas donde se logró con éxito determinar las características espectrales de los ésteres de ácidos grasos alifáticos que se originan en el aceite junto con las bandas características del almidón y la celulosa que dominan el espectro de las patatas fritas (Mazurek et al., 2016).

1.9. Patatas peruanas

La patata (*Solanum tuberosum L.*) pertenece a la familia de las solanáceas, que también incluye el tomate, la berenjena, la guindilla y la petunia. La patata se puede clasificar de acuerdo con su color y formas y son de color blanco redondo, blancos largos, pulpa amarilla, rojo redondo, morado redondo y rojizo. La patata es rica en carbohidratos y una serie de micronutrientes como vitamina C, vitamina B1, vitamina B3, hierro y minerales como potasio, fósforo y magnesio. Las patatas también son ricas en antioxidantes dietéticos, que desempeñan un papel vital en la prevención de

enfermedades. Sin embargo, las patatas también contienen compuestos tóxicos, glicoalcaloides, que provocan trastornos gastrointestinales (Sharma et al., 2020). La patata es el tercer cultivo alimentario más importante del mundo con una producción anual promedio de 356 millones de toneladas durante la última década (2007-2016) y se cree que contribuye significativamente a mantener la seguridad alimentaria mundial (Grados et al., 2020).

Las patatas (*Solanum tuberosum L.*) son una fuente importante de carbohidratos y se consumen en los países en desarrollo y en los desarrollados. De acuerdo a su morfología, un tubérculo de patata suele ser de forma ovalada a redonda, con pulpa blanca y piel de color marrón pálido, aunque con frecuencia se encuentran variaciones en el tamaño, la forma y el color de la pulpa (Bordoloi et al., 2012).

El contenido de humedad de los almidones nativos de raíces y tubérculos varía de 14 a 18 %, mientras que el contenido de humedad de los almidones de cereales nativos varía de 10 a 12 % (Tester et al., 2006). El contenido de amilosa de la fécula de patata oscila entre el 25 y el 33 % y las moléculas son relativamente largas en comparación con los almidones de otras fuentes vegetales (Alvani et al., 2011). Las cadenas de amilosa del almidón de patata contienen aproximadamente 670 residuos de glucosa en comparación con los almidones de maíz (305), arroz (250-370) y trigo (270) Asimismo, las longitudes de cadena promedio de la amilopectina de los almidones de patata (29-34 unidades de glucosa) son más largas que las de los almidones de trigo (23), maíz (24) y arroz (23) (Zhu & Hao, 2019). El almidón de patata tiene muy pocos lípidos y proteínas en comparación con los almidones de cereales,

pero contiene cantidades mucho más altas de fósforo en comparación con otros almidones. El contenido de fósforo de la fécula de patata puede oscilar entre 36 mg/100g y 116 mg/100g con una mediana de 60-80 mg/100g.

La caracterización de los usos tradicionales, incluidas las variantes regionales de procesos y transformaciones, y su impacto en la composición bioquímica de los productos finales, representan un campo de investigación aún poco explorado, que puede conducir a una mejor comprensión de las implicaciones para la seguridad alimentaria.

La domesticación y diversificación del cultivo han evolucionado con múltiples usos. Los usos relacionados con los alimentos son abundantes y siguen diferentes procesos primarios que incluyen hervir, cocinar al vapor, liofilizar, secar y fermentar (de Haan & Rodríguez, 2016).

En la actualidad en el Perú, es el principal cultivo en superficie sembrada y representa el 25% del producto bruto interno agropecuario. Es la base de la alimentación de la zona andina y seiscientas mil pequeñas unidades agrarias están relacionadas a su cultivo. La patata es un cultivo competitivo del trigo y arroz en la dieta alimentaria. Es un producto que contiene en 100 gramos; 78 g de humedad; 18,5 g de almidón y es rico en Potasio (560mg) y vitamina C (20 mg).

El Perú es el país con mayor diversidad de patatas en el mundo, al contar con 8 especies nativas domesticadas y 2,301 de las más de 4,000 variedades que existen en Latinoamérica. Además, Perú posee 91 de las 200 especies que crecen en forma silvestre en casi todo el continente (Ministerio de Agricultura del Perú).

La calidad interna y externa en la patata para la elaboración de los productos de mayor consumo tienen una influencia decisiva en la capacidad de elaboración de un producto y en la economía de la producción. La calidad externa de la patata viene determinada por el tipo de variedad y por las influencias del ambiente. Las características son influenciadas por las condiciones ambientales. Algunas de ellas son: coloración verde del tubérculo, tubérculos deformados, deterioro, agujeros y corazón hueco de los tubérculos, pudriciones y rajaduras por sequía. Las características influidas por la variedad son: profundidad de los ojos, color de la piel y carne, forma y tamaño del tubérculo y rendimiento de cosecha (Garayo & Moreira, 2002). La calidad interna está determinada por la composición química de la patata, que es uno de los factores más utilizados para la clasificación y compra de variedades para la elaboración de diferentes productos de patata. Los componentes más significativos para la industria de procesamiento son los altos contenidos de almidón y materia seca. Otros componentes que influyen en la calidad y clasificación de variedades para diferentes procesos industriales son la glucosa, fructosa y sacarosa. Estos son los azúcares más importantes y los que se encuentran en mayor cantidad en la carne del tubérculo. Además de la composición química, en lo referente a la calidad interna de la patata, la industria procesadora considera la tendencia al oscurecimiento de las hojuelas y los bastones cuando se fríen (de Haan & Rodríguez, 2016).

En Perú se cultivan variedades mejoradas y nativas, entre las mejoradas están las variedades Única, Libertena, Yungay, Renacimiento,

Canchán y Amarilis; y entre las patatas nativas comerciales están Huagalina, Huayro, Peruanita, Chaucha y Huevo de Indio.

De manera particular la variedad Única es una variedad que fue seleccionada y evaluada por el Centro Internacional de la Patata en Perú durante más de siete años, sembrada en experimentos en más de veinte localidades, tiene atributos de resistencia y precocidad que la hacen atractiva para los agricultores involucrados en el cultivo de patata. La adaptación de la Única a diferentes ambientes permite una amplia distribución geográfica, en regiones de la costa y sierra del Perú. Las buenas características para el consumo en fresco y para el procesamiento en tiras, representan una alternativa de mejores ingresos para los agricultores por la demanda que puede generar en el mercado (Rosales et al., 2007). Junto con ello y tal como manifiesta (Lüttringhaus et al., 2021) las variedades locales de patata (*Solanum spp.*) no solo son cruciales para la seguridad alimentaria y el sustento de las comunidades andinas, sino que también están profundamente arraigadas en la cultura local peruana.

La determinación del contenido en materia seca y almidón se realiza mediante el cálculo de gravedad específica de las variedades. El contenido en materia seca determina el rendimiento del producto terminado. Así, por ejemplo, aumenta el rendimiento de las hojuelas por menores pérdidas cuantitativas de evaporación de agua, mientras que disminuye la retención de aceite en la fritura. El contenido ideal en materia seca es de 25% (y del 60-80% de almidón) en el caso de patatas fritas referidas a materia fresca, en caso contrario dejarían de ser comerciales. Asimismo, el contenido en azúcares reductores puede variar desde cantidades trazas hasta más del 10% del peso

seco total del tubérculo, dependiendo de las variedades. Los azúcares reductores tienen una influencia significativa en la elaboración de productos fritos porque influyen directamente en la formación del color y del sabor de estos. Si el contenido en azúcares reductores es alto, aparece un producto con color marrón oscuro y sabor amargo. Por eso, la industria requiere de variedades con bajos contenidos en azúcares reductores; un valor inferior al 0.1% del peso fresco es ideal para la producción de hojuelas (Pedreschi et al., 2016)

El tipo de cultivo, la composición fisicoquímica y el almacenamiento posterior a la cosecha son factores importantes que pueden influir en las características de cocción de las patatas y los productos de patata (Liu et al., 2007).

1.10. Microestructura de patata

Los alimentos producidos por la naturaleza se organizan desde moléculas hasta ensamblajes y orgánulos que luego se compartimentan en células y tejidos. Las estructuras alimenticias “naturales” pueden clasificarse en 4 categorías amplias: (1) estructuras fibrosas ensambladas desde macromoléculas hasta tejidos para una funcionalidad específica (por ejemplo, músculos) y mantenidas juntas en diferentes niveles por interacciones interfaciales específicas; (2) materiales carnosos de plantas que son compuestos jerárquicos de células hidratadas que exhiben presión de turgencia y están unidas entre sí en las paredes celulares (por ejemplo, tubérculos, frutas y vegetales); (3) embriones encapsulados de plantas que contienen una dispersión de almidón, proteína y lípidos ensamblados en paquetes discretos (por ejemplo, en granos y legumbres); y (4) líquido complejo único llamado

leche, destinado a la nutrición del mamífero joven que contiene varios nutrientes en estado de dispersión (Parada & Aguilera, 2007). La mayoría de las frutas, verduras, carnes, pescados, granos y tubérculos se comen en todo el mundo con un procesamiento menor; por lo tanto, su microestructura comestible ha sido impartida en gran medida por la naturaleza. Los alimentos procesados (por ejemplo, productos horneados y de confitería, pasta seca, carnes procesadas, etc.), por otro lado, son matrices estructuradas de múltiples componentes donde los componentes individuales (proteínas, grasas, carbohidratos, etc.) se han reensamblado como dispersiones coloidales, emulsiones, fases amorfas o cristalinas, o redes de gel por calentamiento y/o enfriamiento y aplicación de cizalla.

Por microestructura del alimento se entiende como la disposición espacial de los elementos identificables en un alimento y sus interacciones a niveles inferiores a 100 μm (J. Aguilera, 2005; Sharma et al., 2020).

La microestructura de la pulpa de la patata y las propiedades de los polímeros de la pared celular (tamaño de las células del parénquima, naturaleza de los materiales pécticos) son dos factores importantes que pueden influir en la deformación que se produce durante la masticación o el procesamiento mecánico. Las patatas crudas muestran ruptura celular mientras que las cocidas muestran separación celular debido a la desestabilización de los materiales pécticos durante el procesamiento térmico (Bordoloi et al., 2012; Guedes et al., 2021). Se ha informado que las características microestructurales de las patatas crudas, como el tamaño de las células del parénquima, la composición de la pared celular y el grosor, tienen un efecto considerable en la textura final (Bordoloi et al., 2012).

La porosidad de la corteza de los alimentos durante la fritura se considera un factor importante que contribuye a la rugosidad de la superficie, lo que a su vez afecta la adsorción de aceite. La porosidad y el tamaño de los poros de los alimentos fritos tienden a disminuir con el tiempo de fritura. Esto puede atribuirse a cambios fisicoquímicos como gelificación de proteínas, contracción muscular debido al calentamiento intenso. La disminución de la porosidad con el aumento del tiempo de fritura puede deberse al hecho de que el aceite adsorbido en la matriz alimentaria cristaliza para formar una estructura compuesta con las fibras musculares, lo que da como resultado la destrucción de los poros (Lalam et al., 2013). El deterioro del tejido conjuntivo del colágeno debido al calor provoca la contracción, hinchazón, la desnaturalización, gelificación y aglomeración de proteínas, además de la pérdida de humedad y la adsorción de aceite durante la fase de enfriamiento, contribuyen a la modificación de la estructura de los poros (Kassama & Ngadi, 2004).

Mediante el uso de congelación rápida y criosección después de freír se observaron tres capas microestructurales diferentes en la patata: capa de corteza externa formada por las células dañadas después de freír, capa media formada por las células encogidas después de la evaporación del vapor de agua de la patata, alimento y núcleo interno que tiene células completamente hidratadas y está intacto en la naturaleza (Aguilera & Gloria-Hernandez, 2000). El núcleo de los chips fritos mostró células no deformadas con gránulos de almidón, mientras que la imagen de microscopía electrónica de barrido mostró daño mecánico de las células en la superficie exterior. Esto se debió al daño a las células debido al proceso de corte. También se reveló que el

hinchamiento de los gránulos de almidón se produjo en la región del núcleo, como resultado de la hidratación y gelatinización (Teruel et al., 2015).

El tejido de la patata consta de células grandes (200 x 340 μm) y pequeñas (80 x 90 μm), y se observó que cada célula contiene de seis a diez gránulos de almidón grandes (10-70 μm de diámetro) y cientos de gránulos de almidón muy pequeños (0,5 -1,0 μm), además se ha informado que los tubérculos tienen un contorno poliédrico isodiamétrico, con variación en el tamaño de la celda, la forma de la celda, el grosor de la pared celular y el tamaño de los gránulos de almidón entre los cultivares (Singh et al., 2005). La Figura 2 muestra una imagen de microscopio óptico y SEM de una sección de una patata variedad Única en la que algunas de estas características son evidentes.

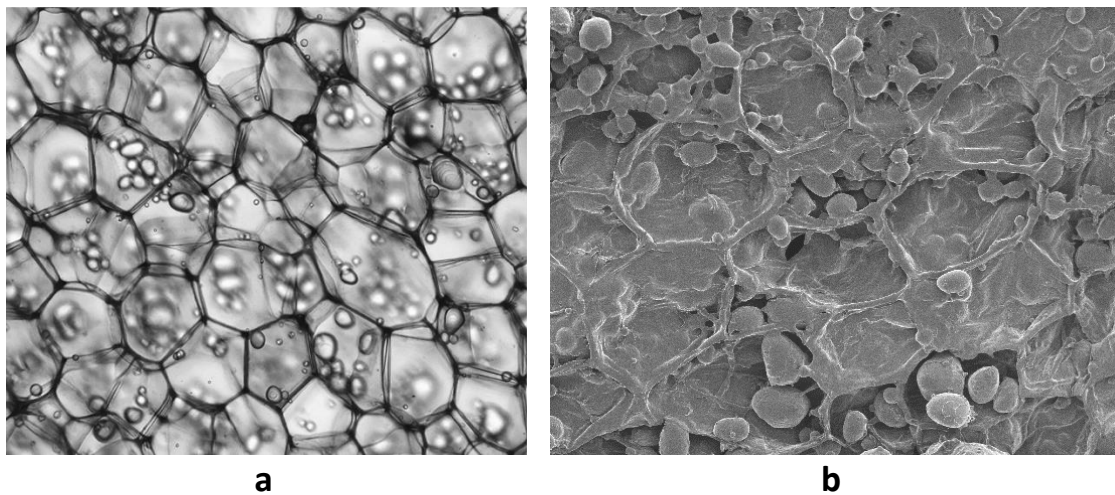


Figura 2. Micrografía óptica (a) y electrónica de barrido (b) de tejido fresco de una patata variedad única que muestra la estructura celular y los gránulos de almidón

Fuente. (Bordoloi et al., 2012)

Los cambios principales que ocurren cuando las patatas se fríen son que la alta temperatura y el agua existente dentro de las células y estas

conducen a la gelatinización del almidón. El agua dentro de las células es adsorbida por los gránulos de almidón antes de que ocurra la deshidratación de las células. Se usó microscopía de escaneo láser confocal para seccionar la corteza de patata después de freír y reveló que el aceite de freír estaba ubicado en el interior en bolsas o alrededor de células de patata intactas (Bouchon & Aguilera, 2001; Pedreschi et al., 2016).

Las técnicas de microscopía son valiosas para examinar los cambios en la microestructura de la patata y la gelatinización del almidón *in situ*. Sin embargo, no se ha desarrollado un método cuantitativo estandarizado para medir tales cambios, lo cual sería útil para evaluar estos cambios cuando se usan diferentes formas de calor para freír patatas en relación con la digestibilidad.

1.11. Determinación de Parámetros microestructurales

La metodología general utilizada en el análisis de imágenes digitales suele dividirse en diferentes pasos consecutivos (Miranda & Aguilera, 2006; Oblitas et al., 2021). Estos diferentes pasos son: adquisición de imágenes, operaciones de procesamiento previo, segmentación de imágenes y extracción de características, y pueden describirse como:

- La adquisición de imágenes es el primer paso natural en el proceso de análisis de imágenes. Consiste en la captura de la imagen en forma digital. Los tecnólogos de alimentos están interesados en observar la estructura de los alimentos a escalas que van desde el nivel atómico hasta el macroscópico utilizando varias técnicas de imagen diferentes. Las cámaras de dispositivo acoplado cargado conectadas a microscopios y escáneres

para la digitalización de copias impresas de imágenes son herramientas útiles que se utilizan hoy en día para este propósito.

- A continuación, se realiza un procesamiento previo de las imágenes sin procesar para producir una versión mejorada de la imagen original que facilita los pasos de análisis posteriores. Esto suele implicar la corrección de distorsiones geométricas, la eliminación de ruido, la corrección del nivel de gris, la corrección de la borrosidad, etc.
- La segmentación de imágenes implica dividir la imagen digital en regiones inconexas y que no se superponen. Este paso se considera la operación más importante durante el proceso de análisis de imágenes digitales, porque las mediciones posteriores dependen en gran medida de la precisión de esta operación. Este paso puede implicar la conversión de imágenes en color en imágenes en escala de grises, también llamadas imágenes de intensidad.
- La extracción de características implica la aplicación de diferentes algoritmos para generar datos cuantitativos basados en la información contenida en la imagen. Es posible, por ejemplo, obtener medidas específicas de objetos que impliquen el cálculo de propiedades geométricas (como área, perímetro, factores de forma, etc.). La imagen en escala de grises también puede servir para producir mediciones globales asociadas con el contenido de información general de la imagen, como el color y la textura.

De acuerdo a (He et al., 2022) el resultado del proceso de segmentación es una imagen donde se identifican con precisión los objetos de interés. El siguiente paso inmediato es cuantificar esos objetos midiendo sus características individuales. La mayoría de las mediciones directas en objetos

individuales están relacionadas con el tamaño y la forma. Para el tamaño y la forma, se pueden hacer varias medidas específicas diferentes, y hay una variedad de formas diferentes de realizar las operaciones. Algunas de las características más usadas para caracterizar células son:

- **Tamaño.** El tamaño de los objetos se puede caracterizar por tres características, a saber, el área, el perímetro y el diámetro. El área suele ser la característica de tamaño más utilizada para caracterizar objetos. Para las imágenes digitales, el área se determina contando el número de píxeles que forman parte de los objetos. El perímetro del objeto es una característica útil que se utiliza para discriminar entre objetos con formas simples y complejas. Las medidas de área y perímetro se pueden calcular mediante imágenes segmentadas de conteo de píxeles. El diámetro del objeto se puede estimar directamente si el objeto tiene forma redonda.

Un enfoque utilizado para caracterizar un objeto de forma circular no perfecta es medir su diámetro equivalente (Mayor et al., 2008; Zhu & Hao, 2019). El diámetro equivalente es el diámetro del círculo que tiene la misma superficie que el objeto, está definido por la siguiente ecuación.

$$\text{Diámetro equivalente} = \sqrt{\frac{4 \text{ Área}}{\pi}}$$

- El perímetro (longitud) es el número de píxeles en el límite del objeto.
- Longitud de eje mayor. Son los extremos (x, y) de la línea más larga que se puede dibujar a través del objeto. Los puntos finales del eje principal (x₁,y₁) y (x₂,y₂) se encuentran calculando la distancia de píxeles entre cada combinación de píxeles de borde en el límite del objeto y encontrando el par con la longitud máxima. La longitud del eje mayor de un objeto es la

distancia en píxeles entre los extremos del eje mayor y viene dada por la relación:

$$\text{Longitud eje mayor} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

- Longitud de eje menor. El eje menor son los extremos (x, y) de la línea más larga que se puede trazar a través del objeto mientras permanece perpendicular al eje mayor. Los extremos del eje menor (x₁, y₁) y (x₂, y₂) se encuentran calculando la distancia de píxel entre los dos extremos del píxel del borde. La longitud del eje menor de un objeto es la distancia en píxeles entre los extremos del eje menor y viene dada por la relación:

$$\text{Longitud eje menor} = \sqrt{(x_{2'} - x_{1'})^2 + (y_{2'} - y_{1'})^2}$$

- Redondez: Relación entre el área del objeto y la de un círculo con el mismo perímetro. La redondez da un valor entre 0 y 1, siendo 1 un círculo perfecto. Se puede obtener una medida de redondez o circularidad (relación área-perímetro) que excluye las irregularidades locales como la relación entre el área de un objeto y el área de un círculo con el mismo perímetro convexo:

$$\text{Redondez} = \frac{4\pi \cdot \text{área}}{(\text{Perímetro})^2}$$

- **Elongación:** relación entre la longitud del eje mayor (la línea más larga que se puede dibujar a través del objeto) y la longitud del eje menor (la línea más larga que se puede dibujar a través del objeto perpendicular al eje principal). En su forma más simple, el alargamiento es la relación entre la longitud y el ancho del cuadro delimitador del objeto. A medida que la relación aumenta de 1, el objeto se alarga. Este parámetro está definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Elongación} = \frac{\text{Longitud eje mayor}}{\text{longitud eje menor}}$$

- La compactación se define como la relación entre el área de un objeto y el área de un círculo con el mismo perímetro. Se utiliza un círculo porque es el objeto con la forma más compacta. La medida toma un valor máximo de 1 para un círculo. Este parámetro está definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Compactación} = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{Área}}{\pi}}$$

Capítulo 2

Objetivos y plan de trabajo

2. Objetivos y plan de trabajo

2.1. Justificación e interés de la tesis doctoral

La presente investigación referida a las relaciones estructura – propiedad – proceso en patata describirá, mediante un análisis matemático predictivo, cómo la microestructura y la textura pueden ser usadas para optimizar los procesos de producción de alimentos, así como para desarrollar nuevos productos con la deseable calidad organoléptica. Asimismo, servirá de plataforma para promocionar variedades industriales de patata y hacer a la comunidad Cajamarquina (Cajamarca, Perú) consciente y partícipe del aprovechamiento sostenible de la amplia biodiversidad andina peruana.

Desde el punto de vista teórico, se generará evidencia experimental de teorías tales como el análisis de las estructuras en tejidos vegetales, para la caracterización de los elementos estructurales del tejido (células y espacios intercelulares). Se puede demostrar que la mayoría de las propiedades macroscópicas dependen de las características microscópicas.

Al mismo tiempo, la existencia de otras investigaciones sobre este tópico indica la necesidad del estudio sobre el tema de relaciones estructura – propiedad – proceso en patata, puesto que los mismos servirán de plataforma para futuras investigaciones

Por este motivo, la investigación tiene como fin brindar información acerca de las relaciones estructura – propiedad – proceso en patata, por lo que se hace necesaria la identificación de dichas causales con el fin de potenciar una industria alrededor de este producto.

Las propiedades de los alimentos son función de su estructura y de sus cambios durante el procesado. Las propiedades de transporte, las propiedades fisicoquímicas o los parámetros de calidad y seguridad, varían a lo largo del proceso obedeciendo a funciones que relacionan la estructura con las propiedades y en respuesta al proceso impuesto. Estas relaciones, conocidas como relaciones estructura-propiedad-proceso constituyen uno de los temas centrales de estudio en ingeniería de alimentos (Aguilera, 2005, 2006; Aguilera & Stanley, 1999). La estructura y las propiedades pueden definirse a diferentes escalas: molecular, micro-, meso-, macroscópica; todos los niveles de observación son relevantes, debido a que un cambio a escala molecular o microscópica se ve reflejado en las propiedades macroscópicas del alimento (Aguilera, 2005).

En la última década se ha impuesto el concepto de ingeniería de proceso dirigida al producto, cuyo objetivo es el diseño y control de procesos que den lugar a productos de características de calidad y seguridad predeterminadas. Sin embargo; resulta imposible predecir los cambios que sufre un alimento durante el procesado si se desconocen las relaciones que desembocan en la modificación de las propiedades macroscópicas del alimento (Aguilera, 2006; Fito et al., 2007; Mebatsion et al., 2008). En base a este concepto, los modelos matemáticos aplicados a los procesos alimentarios deberían incorporar funciones que relacionen la estructura, las propiedades y el proceso en cuestión, con el fin de predecir adecuadamente las propiedades que tendrá el producto final.

De este reconocimiento surge el concepto de alimentos reales, en oposición al tradicional enfoque que simplifica excesivamente tanto el sistema

alimentario como los mecanismos y ecuaciones de velocidad. Partiendo de conceptos anteriores, tales como estructura-complejidad y estructura-funcionalidad, los esfuerzos realizados por grupos de referencia internacional como los de los profesores LeMaguer (University of Guelph, Canada) y Aguilera (Universidad Católica de Chile), han contribuido a impulsar el reconocimiento de la complejidad de los sistemas alimentarios en el análisis de las operaciones y procesos de la Ingeniería de Alimentos, y especialmente de las operaciones de transferencia de materia.

Planteamiento del problema.

El presente estudio tiene como finalidad profundizar en el conocimiento de las relaciones estructura-propiedad-proceso en cinco variedades de patata durante el proceso de fritura, las variedades son variedad Única, variedad Libertena, variedad Yungay, variedad Amarilis y variedad Huevo de Indio

Según Scott et al. (2000) los cultivos de raíces y tubérculos serán un componente importante en el sistema alimentario global hacia el 2020 y más de dos mil millones de habitantes de Asia, África y Latino América dependerán de esos cultivos para alimentación y generar sus ingresos. Por ello, es fundamental el estudio y priorización del cultivo de especies vegetales con actividad validada o con demanda creciente en el mercado internacional, de la mano con la investigación agronómica, agroindustrial, fitofarmacéutica, fitoquímica, biológica y clínica, como lo propone Li (2006).

Se trabajará con variedades de patata (*Solanum tuberosum*), desarrollando un procedimiento para identificar y cuantificar las relaciones

estructura-propiedad-proceso en alimentos a fin de que en posteriores investigaciones puedan, incorporarlas a modelos predictivos, utilizando una aproximación multiescala.

La modelización de las operaciones de fritura es un claro ejemplo de la habitual excesiva simplificación de los sistemas alimentarios. Con frecuencia, los modelos aplicados no son capaces de predecir los cambios en las propiedades del alimento debido a que utilizan relaciones simplificadas y no tienen en cuenta el efecto del proceso sobre la estructura y sobre las propiedades macroscópicas. Reflejo de este hecho es la gran dispersión de los valores de difusividad efectiva que pueden encontrarse en la bibliografía (Martinez et al., 1998).

Estos modelos matemáticos deberían incorporar y procesar información sobre aspectos complejos de diversa índole: termodinámicos, estructurales, químicos y bioquímicos, mecánicos, etc., sin embargo, los modelos actuales eliminan la mayor parte de la información relevante para evaluar la calidad del alimento y los cambios que la misma sufrirá durante el proceso, dando lugar a modelos que no predicen la evolución de muchas de las características del producto. Conscientes de este hecho, se hace esta propuesta con el interés de aportar avances en el conocimiento e interpretación de las relaciones estructura-propiedad-proceso de tejidos vegetales.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivos generales

- Identificar y analizar las características microestructurales de 5 variedades de patata (*Solanum tuberosum*) en material fresco.
- Identificar y analizar las relaciones estructura-propiedad-proceso en patata (*Solanum tuberosum*) sometido a procesos de fritura.

2.2.2. Objetivos específicos

- Generar un software para poder analizar los tejidos de patata, evaluando 7 características microestructurales en células, las cuales son compactación celular, elongación celular, redondez celular, Longitud de eje mayor de célula, Longitud de eje menor de célula, perímetro y área celulares.
- Comparar los siete parámetros microestructurales en cinco variedades de patata usadas para fritura, las cuales son Variedad Única, Variedad Libertena, Variedad Yungay y Variedad Amarilis y variedad de patata nativa Huevo de Indio.
- Evaluar el núcleo de cinco variedades de patata usando micrografías SEM.
- Evaluar el efecto del tiempo y temperatura sobre las características microestructurales y fisicoquímicas de cinco variedades de patata usando un arreglo estadístico de superficie de respuesta.
- Evaluar la correlación entre las variables microestructurales y fisicoquímicas usando los coeficientes de Pearson.

- Evaluar el contenido de aceite dentro del núcleo de las cinco variedades de patata usando espectroscopía RAMAN.

2.3. Plan de trabajo

- Revisión bibliográfica para encontrar los antecedentes sobre el efecto de la temperatura y tiempo sobre características microestructurales en variedades de patata y de esta forma poder fijar el plan de trabajo a seguir.
- Acondicionamiento y puesta a punto de una instalación experimental para procesos de fritura en inmersión de aceite variando la temperatura en el rango de 170° C a 190° C.
- Diseño y validación del sistema informático para determinación de parámetros de análisis de micrografías de patata.
- Evaluar parámetros microestructurales y fisicoquímicos de la variedad Única en un arreglo factorial evaluando las temperaturas 170 °C, 180 °C y 190° C a 3 diferentes tiempos 1 minuto, 2.5 minutos y 4 minutos.
- Evaluar parámetros microestructurales y fisicoquímicos de la variedad Liberteña en un arreglo factorial evaluando las temperaturas 170 °C, 180 °C y 190° C a 3 diferentes tiempos 1 minuto, 2.5 minutos y 4 minutos.
- Evaluar parámetros microestructurales y fisicoquímicos de la variedad Yungay en un arreglo factorial evaluando las temperaturas 170 °C, 180 °C y 190° C a 3 diferentes tiempos 1 minuto, 2.5 minutos y 4 minutos.
- Evaluar parámetros microestructurales y fisicoquímicos de la variedad Amarilis en un arreglo factorial evaluando las temperaturas 170 °C, 180 °C y 190° C a 3 diferentes tiempos 1 minuto, 2.5 minutos y 4 minutos.

- Evaluar parámetros microestructurales y fisicoquímicos de la variedad nativa Huevo de Indio en un arreglo factorial evaluando las temperaturas 170 °C, 180 °C y 190° C a 3 diferentes tiempos 1 minuto, 2.5 minutos y 4 minutos.
- Realizar medidas de espectroscopía Raman en las 5 variedades de patata utilizados con la finalidad de identificar las frecuencias vibracionales características de acuerdo con la temperatura y tiempo de fritura.
- Continuación de la revisión bibliográfica referente a los resultados encontrados en el análisis estadístico.
- Discusión de los resultados, elaboración de conclusiones y comunicación de resultados.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

3. Materiales y Métodos

3.1. Unidad de análisis, población y muestra de estudio

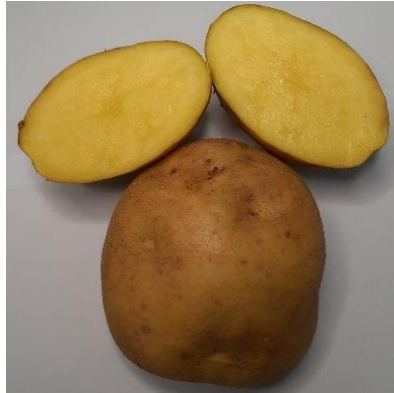
La unidad de análisis es el producto cosechado y seleccionado de acuerdo con los siguientes criterios: producto fresco, recién cosechado de los biotipos industriales (almidón y fritura) del programa de patata del Instituto Nacional de Investigación Agraria del Perú. Todas las muestras al momento de la recolección no presentaron ningún daño externo y se almacenaron a una temperatura de 15 °C con una humedad relativa media del aire del 80 %. Las variedades seleccionadas para la presente investigación son:

- Variedad Única
- Variedad Libertena
- Variedad Yungay
- Variedad Amarilis
- Variedad Huevo de indio (nativa)

De cada una de las 5 variedades, se han seleccionado 3 kg para su procesamiento en fritura y la generación de las micrografías ópticas y SEM además de su medición de características fisicoquímicas. El procedimiento se llevó a cabo por triplicado. Junto con ello se caracterizó las 5 variedades y los resultados se muestran en la Tabla 1 y las imágenes de las variedades en la Figura 3.

Tabla 1. Caracterización de variedades de patata

Características	Unidad	Patata variedad Huevo de Indio	Patata variedad Yungay	Patata variedad Liberteña	Patata variedad Única	Patata variedad Amarilis
Hidratos de carbono	%	25	20	21	16	15
Ceniza	g/100 g	0.97	1.05	0.839	0.803	0.705
Grasas Totales	%	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Humedad	%	67.1	79	78.5	82.9	84.1
Proteína	%	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Sólidos Totales	%	24.65	21.83	22.5	27.37	24.08
Gravedad específica	%	1.095	1.089	1.108	1.105	1.11
Almidón	%	19.2	20.1	20.4	18.9	19.5
Azúcares reductores	%	0.5	0.35	0.31	0.41	0.51
Valor nutricional	kcal/100 g	99.7	79.6	82.4	65.2	60.8



Patata variedad Yungay



Patata variedad Liberteña



Patata variedad Única



Patata variedad Huevo de Indio



Patata variedad Amarilis

Figura 3. Variedades de patata usadas en la investigación

3.2. Proceso de fritura

Las patatas crudas se lavaron, pelaron y luego se cortaron en tiras (10 mm × 10 mm × 40 mm) utilizando un molde cortador cuadrado. Las muestras se sumergieron durante 1 min en agua destilada para eliminar el almidón ocluido adherido a la superficie. Se utilizaron papeles adsorbentes para drenar el exceso de agua sobre la superficie de las rodajas de patata.

El proceso de fritura se realizó en una freidora de la marca Recco (acero inoxidable de procedencia China). Este equipo cuenta con una capacidad de 3 litros de aceite y permite controlar la temperatura. El aceite usado fue de girasol y fue precalentado a 170 °C por 10 min. Se colocaron 10 tiras de patata en el centro de la freidora con la finalidad de obtener muestras uniformes. Las patatas fueron fritas a 3 diferentes temperaturas 170 °C, 180 °C y 190° C, en 3 diferentes tiempos, 1 min, 2.5 min y 4 min para cada temperatura. Se almacenó una porción de aceite antes y después del proceso de fritura para su posterior análisis. Las patatas fritas fueron puestas sobre papel adsorbente para escurrir el aceite excedente y enfriadas a temperatura ambiente antes del análisis. Cada experimento de fritura se realizó con aceite fresco. Los tratamientos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Parámetros de procesos de fritura

Método	Parámetros para controlar	Unidad	Rango para usar
Fritura por inmersión en aceite	Temperatura	°C	[170 - 190]
	Tiempo	minutos	[1 - 4]

Las muestras fueron separadas en 2 partes, el núcleo y la corteza (ver Figura 4). Estas partes fueron analizadas de manera separada. La corteza fue obtenida pelando la parte externa del prisma rectangular en trozos delgados (superficie de la patata frita). El interior de la patata frita sin corteza corresponde al núcleo.

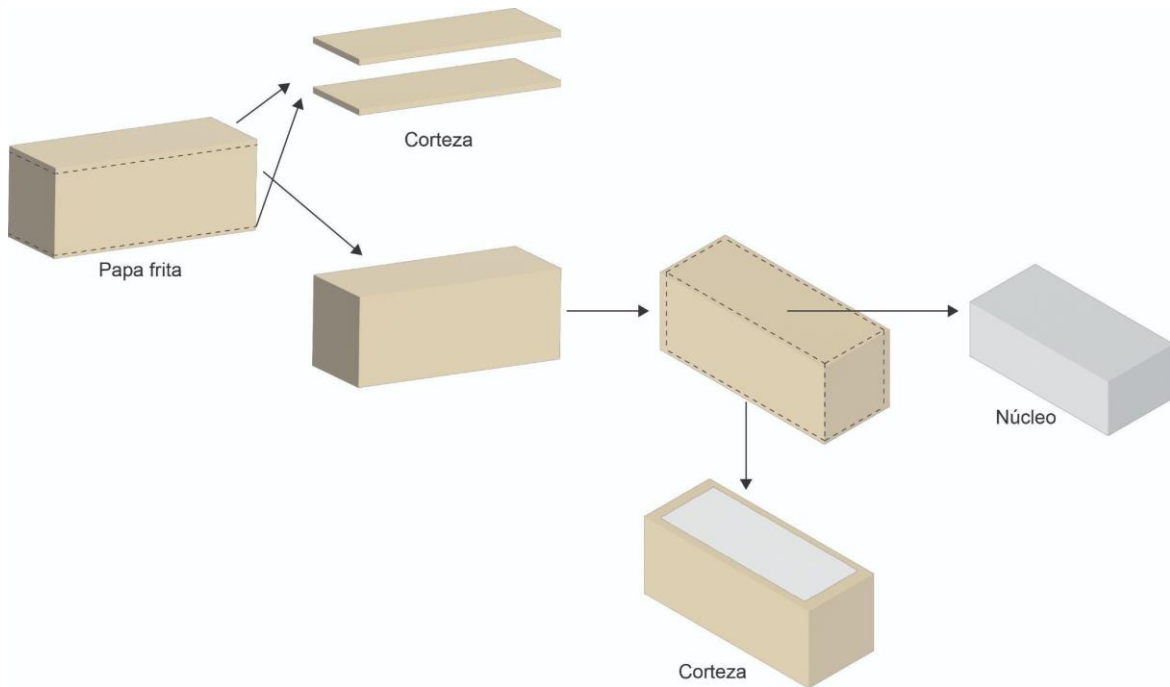


Figura 4. Representación esquemática de las regiones del núcleo y de la corteza de una patata frita con forma de prisma rectangular.

Se realizó un arreglo para cada tratamiento de fritura usando un diseño de compuesto central de superficie de respuesta, lo cual permitirá tomar los datos para los parámetros microestructurales y al mismo tiempo observar los efectos simples con respecto a las variables de salida.

Tabla 3. Variables respuestas

N°	Tipo de análisis	Respuestas
1	Análisis Microestructural	Área (μm^2)
2		Perímetro (μm)
3		Longitud eje mayor (μm)
4		Longitud eje menor (μm)
5		Redondez
6		Elongación
7		Compactación
8	Análisis Fisicoquímico	L*
9		a*
10		b*
11		ΔE
12		Acrilamida (mg/kg)
13		Humedad (%BH)
14		Grasa (%BS)
15		Textura (N)

3.3. Obtención de micrografías en microscopio óptico

La muestra de patata frita se cortó una sección (1 cm x 0,5 cm x 0,5 cm) y se seccionó con un vibrátomo (Leica VT1000S). Las secciones fueron de 10 μm . Todas las muestras se transfirieron a portaobjetos de microscopio recubiertos con una Solución de poli-L-lisina al 0,01 % y se añadieron una gota de colorante azul de toluidina al 5%. Las láminas procesadas se examinaron en un microscopio binocular con sistema óptico de corrección del color al infinito marca Motic. Después se tomaron fotografías de las preparaciones con los objetivos 4x y 10x, mediante una cámara Motic de 10 Megapíxeles acoplada al microscopio usando el software Motic Image Plus 3.0.

3.4. Implementación y caracterización microestructural de patata

Las muestras, previamente tratadas serán caracterizadas obteniendo la distribución estadística de los parámetros de tamaño y forma (Figura 5) de cada uno de los elementos estructurales del tejido vegetal en estudio.

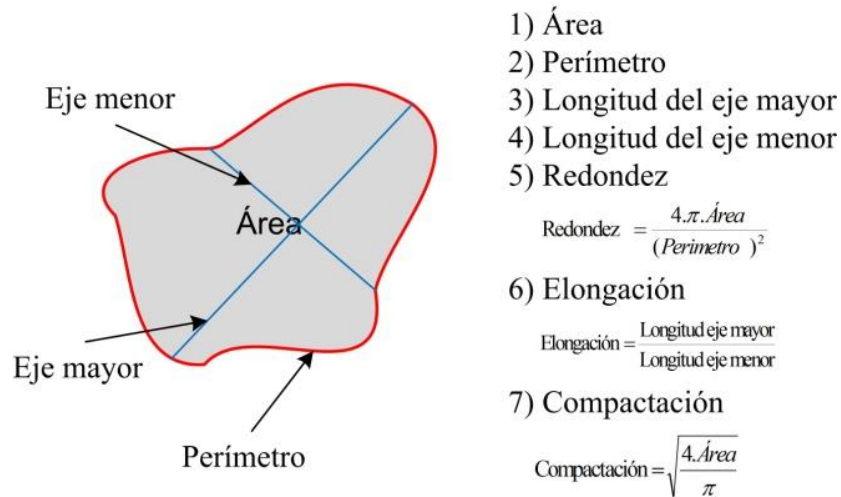


Figura 5. Parámetros de tamaño y forma para el análisis microestructural

Fuente: (Castro, Yoshida, et al., 2019)

Para obtener la información de cada elemento, así como para individualizar estos, se desarrollará un sistema automatizado a partir de la propuesta de Castro et al. (2011). El sistema se implementará en el software matemático Matlab 2019a, el detalle de este desarrollo informático se dará en el capítulo 4.

3.5. Análisis de color

El color de las patatas fritas se determinó mediante Chroma Meter (CM-2003d, Konica Minolta, Japón). El espectrofotómetro se calibró con una pizarra blanca estándar antes de la prueba. La escala se exhibió en L^* (0 = negro; 100 = blanco), a^* (-a = verde; +a = rojo), y b^* (-b = azul; +b =

amarillo). Se realizaron mediciones de color en diez lugares de la superficie de cada muestra. Las diferencias de color generales (ΔE) se calcularon de la siguiente manera:

$$\Delta E = \sqrt{(L * -L * _0)^2 + (a * -a * _0)^2 + (b * -b * _0)^2}$$

3.6. Textura

La textura de las patatas fritas se evaluó con la prueba de punción utilizando el Brookfield Texture Analyzer (TA-CT3 Texture Technologies Corporation, Scardale, NY, EE. UU.). La firmeza de las rodajas de patata cruda se definió como la fuerza máxima de penetración. Se colocó la tira de patata en el medio de una placa de fijación hueca (soporte de 2 puntos - olla TA-DEC hueca de 0,018 m) y se penetró con una sonda en forma de cono con un ángulo de 30° (TA-17). La sonda se introdujo en la muestra a 0,1 mm/s y se fijó una distancia objetivo de 3 mm para asegurar la ruptura de los cortes. La dureza se utilizó para caracterizar la resistencia mecánica de las patatas fritas, identificada como la fuerza máxima registrada para romper las patatas fritas (Zheng & Moreira, 2020). Se midieron diez muestras en tres posiciones (dos extremos y un centro) para cada experimento, y los experimentos se realizaron por triplicado. Dado que solo se tiene interés en el comportamiento crujiente de la corteza, solo se evalúa el primer milímetro de deformación para el recuento máximo. Todas las pruebas de fractura se realizaron por triplicado.

3.7. Determinación de grasa

La cantidad de grasa en las hojuelas analizadas se determinó aplicando el procedimiento Soxhlet AOAC (Rani & Chauhan, 1995). Se extrajeron

porciones de 5 g de las muestras de patatas fritas durante 180 min utilizando éter dietílico como disolvente (150 ml/muestra). El procedimiento se repitió tres veces para cada muestra y se calculó un resultado final como valor medio de los datos obtenidos. El contenido de aceite se expresó en g/g base seca de tiras de patata.

3.8. Determinación de humedad

El contenido de humedad de las muestras se determinó según el método de la AOAC 964.22. Se trituraron alrededor de 4 g de muestras y se secaron en una estufa (Marca POL-EKO de procedencia polaca) a 105 ± 2 °C hasta alcanzar el peso constante. El contenido de humedad se presentó como g/g base húmeda de tiras de patata.

3.9. Determinación de acrilamidas

Para la determinación de acrilamida en las tiras de patata frita se utilizó el método de cromatografía líquida con espectrometría de masas (LC/MS-MS); la unidad de lectura es en $\mu\text{g}/\text{kg}$, para dicho análisis se usó 100g por cada muestra; dicho análisis se realizó en el laboratorio AGQLab – Perú.

3.10. Determinación de micrografías SEM

Para el análisis con microscopía electrónica se adhirió una fracción de patata frita encima del porta muestras fijándola con cintas de carbono y de cobre. El análisis SEM se realizó utilizando un equipo de microscopía electrónica FEI modelo Quanta 650. Se aplicó un voltaje de aceleración de 5 kV y un tamaño del haz de electrones de 3 para la toma de imágenes. Las muestras liofilizadas (corteza y núcleo) fueron recubiertas con oro antes de

medir en el microscopio electrónico. Las micrografías fueron obtenidas a 200X.

3.11. Toma de espectros RAMAN

Las patatas fritas fueron cortadas en pequeños trozos y luego congeladas utilizando nitrógeno líquido. Posteriormente se secaron por medio de un liofilizador de la marca Thermo Scientific modelo Telstar LyoQuest a una temperatura de condensación 0.9 °C y presión de 10.00 mbar por 12 horas. Terminado el proceso, se almacenaron en un desecador para su posterior análisis.

Para identificar los compuestos presentes en las diferentes muestras liofilizadas por medio del análisis de espectroscopía μ Raman se procedió a cortar una sección de las muestras con el fin de obtener un mejor enfoque con el microscopio óptico en diferentes zonas. Se utilizaron diferentes longitudes de onda de excitación, i.e. 514 nm, 785 nm, y 633 nm correspondientes a un láser de Argón, laser de diodo, y de Helio-Neón, con la finalidad de identificar las mejores condiciones para obtener la señal Raman. La longitud de onda de excitación que mostró la mejor relación señal-ruido y respuesta respecto a la luminiscencia fue la de 785 nm. Las medidas se realizaron con un objetivo de 50X utilizando un 10% del total de la intensidad del láser. Además, se utilizó la opción de Pinhole Out en el sistema Raman, ya que tiene una línea de excitación. Esto proporciona un spot más amplio de medición, obteniendo una mayor señal. A diferencia del Pinhole In que tiene la forma de un punto. En algunos casos se empleó un porcentaje menor de la intensidad del láser, con el objetivo de conseguir un espectro Raman bien definido sin saturación del espectro, debido a la luminiscencia de la muestra.

3.12. Técnicas de procesamiento y análisis de información

Los datos fueron analizados a través de un ANVA Multifactorial con arreglo de Superficie de Respuesta para comparar los datos de cada tipo de variedad y ver los efectos simples en cada variable.

Capítulo 4

Desarrollo de sistema para medición de microestructura

4. Desarrollo de sistema para medición de microestructura

Las imágenes para el desarrollo del sistema estuvieron en el formato JPG correspondieron a micrografías ópticas de tejido de patata (*Solanum tuberosum*). La metodología utilizada para el desarrollo de la aplicación informática se dividió en las etapas que se describen a continuación:

a) Desarrollo de algoritmos. Se desarrollaron algoritmos para el procesamiento y análisis de imágenes y para la clasificación de características estructurales con el software Matlab (versión 2019a), siguiendo la propuesta de (Castro, Yoshida, et al., 2019; Du & Sun, 2006).

b) Implementación de software. El software fue implementado también con Matlab, utilizando funciones e interfaces de usuario, denominadas guías, diseñadas para facilitar su uso. De esta forma se separó la funcionalidad del software en los siguientes módulos: preprocesamiento, procesamiento, clasificación y análisis estadístico.

c) Optimización de parámetros para la red neuronal. En esta etapa, el sistema implementado se aplicó en algunas micrografías. Los elementos de la estructura en las micrografías fueron localizados y caracterizados mediante parámetros de tamaño y forma seleccionados por el software (entradas), y clasificados manualmente como celdas o espacios intercelulares (salidas). La red neuronal se entrenó con el conjunto resultante de salidas y entradas y se optimizaron las combinaciones de parámetros de entrada a utilizar.

d) Validación de la solicitud. Una vez optimizada la combinación de parámetros, se aplicó el sistema a otras micrografías diferentes para clasificar

los elementos estructurales, determinar la eficiencia en el proceso de clasificación y, finalmente, obtener el análisis estadístico de los parámetros de tamaño y forma de las células y espacios intercelulares.

4.1. Desarrollo de software

4.1.1. Pre – procesamiento y Desarrollo de algoritmos

Las funciones e interfaces de usuario (GUIs) se implementaron en script de Matlab 2019a y se basaron en el en el trabajo de (Oblitas-Cruz et al., 2016), así como las propuestas de (Du & Sun, 2006). La imagen fue convertida a escala de grises, usando la ecuación 1.

$$g = 0.21 R + 0.72 G + 0.07 B \quad (1)$$

Donde: g es la imagen en escala de grises, R, G y B son las capas de la imagen RGB. Asimismo: se aplicaron realce y mejoramiento de la imagen, mediante ajuste de histograma (ecuación 2) y filtrado de medias (ecuación 3).

$$T(r_k) = \sum_{j=1}^k p_r(r_i) \quad (2)$$

$$I_{(x,y)} = \frac{1}{M} \sum_{(k,l) \in N} f[k, l] \quad (3)$$

Donde: T es la imagen realzada, r es la imagen original, p_r es la función de densidad de probabilidad, j es la posición de 1 a k. Asimismo, M es el número total de pixeles en la vecindad M.

Después la imagen fue convertida a formato binario (ecuación 4), esqueletizada (ecuación 5) y eliminados aquellos elementos con un área menor a ochenta pixels y/o en contacto con el borde.

$$I_{BIN}(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{si } I(x,y) \geq t \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases} \quad (4)$$

$$S(X) = \bigcap_{p>0} \bigcap_{\mu>0} [(X\theta pB) - (X\theta pB) \circ \mu\bar{B}] \quad (5)$$

Donde: I e I_{BIN} son la imagen original y la imagen binarizada, t es el umbral de binarizado. X es la imagen binaria continua, S es la imagen esqueletizada, Θ y \circ son los operadores morfológicos de erosión y apertura, pB y $p\bar{B}$ son los elementos de apertura y cierre de radio p.

Después se etiquetaron los elementos presentes en la imagen esqueletizada los cuales se clasifican mediante un operador entrenado en dos clases (célula / espacio intercelular). Imágenes de los elementos clasificados fueron guardado en carpetas separadas para el entrenamiento de la Red Neuronal Convolutiva (RNC).

4.1.2. Procesamiento.

Esta secuencia de operaciones ubica y etiqueta los elementos de estructura en la micrografía, determina algunos parámetros morfológicos seleccionados y elimina los elementos de borde. El algoritmo comienza con la conversión a una imagen binaria en blanco y negro, utilizando la función `im2bw`; luego se esqueletizó la imagen con la función `bwmorph` (`operation='skel', times='Inf'`) (`operation='spur', times='Inf'`); se aplicó la función `bwareaopen` (dimensión = 40) para la eliminación de agujeros; se usó `imdilate` para la dilatación; el marcaje se realizó con las funciones `bwlabel` y `label2rgb`, y se utilizó `regionprops` para la determinación de los parámetros morfológicos.

Los parámetros morfológicos determinados se resumen en la Figura 5 y mostrados en el software generado en la Figura 6 y fueron: área (A), diámetro equivalente (D), longitud del eje mayor (L), longitud del eje menor (l), perímetro (P), redondez (R), elongación (E) y compacidad (C); todos los cuales habían sido utilizados por otros autores en la clasificación o descripción de elementos microestructurales en tejido vegetal parenquimático (Lewicki & Porzecka-Pawlak, 2005; Mayor et al., 2011). Este paso generó una matriz con datos de elementos reconocidos, pero aún no clasificados.

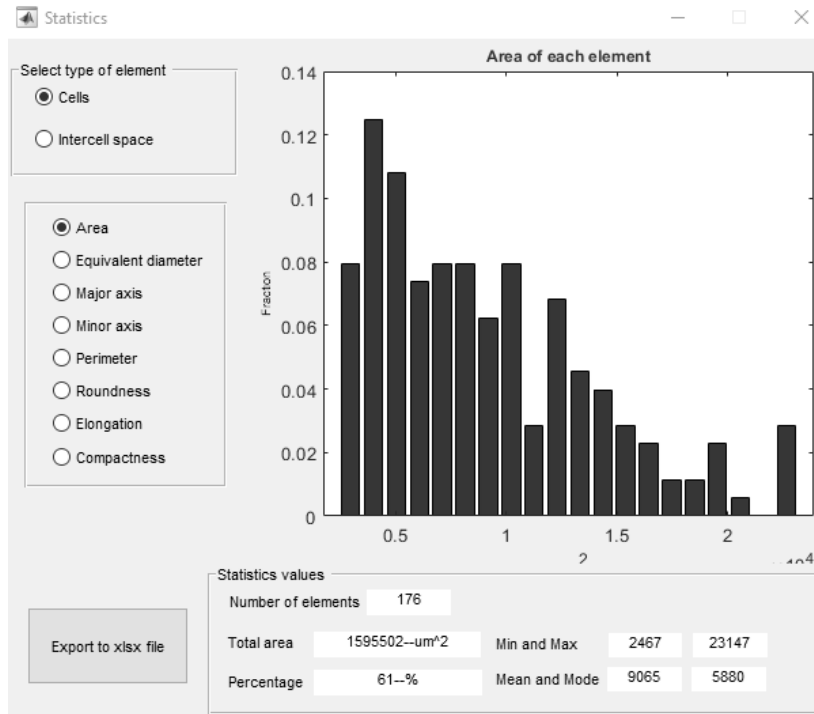


Figura 6. Parámetros morfológicos calculados

Además, el algoritmo es capaz de eliminar los elementos seccionados, es decir, aquellos elementos en el borde de la imagen, ya que no sería posible atribuir una clase específica a estos elementos incompletos.

El algoritmo analiza los elementos etiquetados, verificando que ninguno de sus píxeles se encuentre dentro de los límites de la micrografía.

Los elementos que cumplen la condición se seleccionan para su posterior análisis.

4.1.3. Clasificación.

La RNC utilizada en este estudio es la AlexNet, cuya estructura generalizada se muestra en la Figura 7. La AlexNet tiene cinco capas convolucionales y tres capas conectadas. Cada capa convolucionada contiene múltiples filtros 3D (núcleos), conectados a la salida de la capa previa. Las capas conectadas contienen múltiples neuronas, con valores positivos, conectadas a la capa previa.

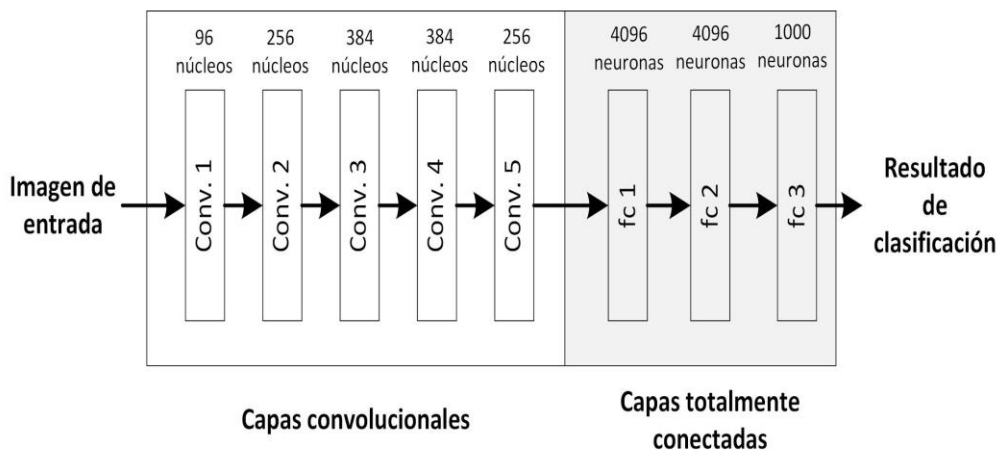


Figura 7. Esquema general de aplicación CNN

La AlexNet, precargada en Matlab 2019a, fue modificada a fin de usar el diseño previamente entrenado, en forma similar a la realizada por (Castro, Oblitas, et al., 2019). Esencialmente se modificaron los parámetros de las tres últimas capas a fin de transferir el entrenamiento del resto de capas y adecuarlas al proceso de clasificación de las clases establecidas, véase Figura 8.

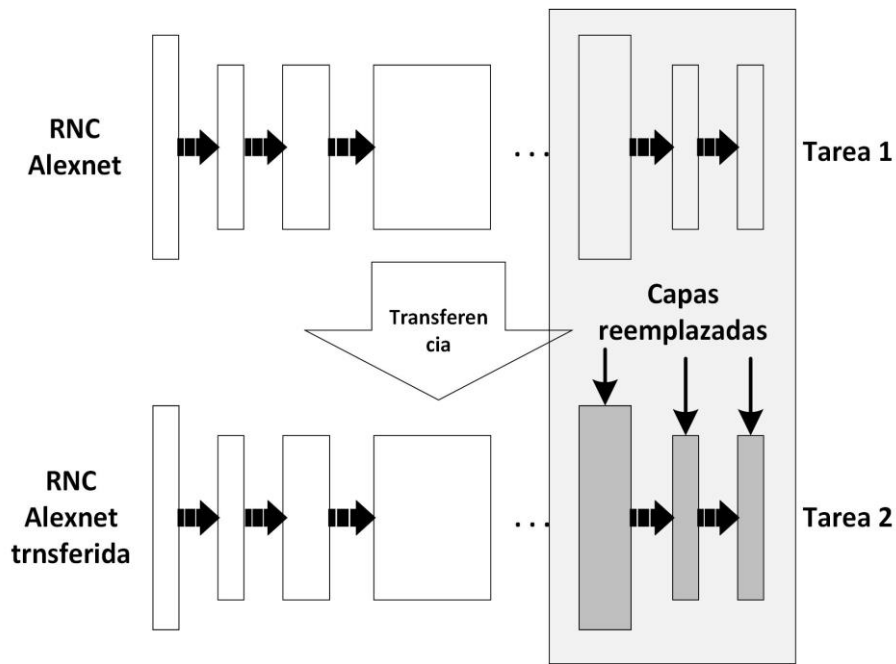


Figura 8. Esquema de adaptación RNC Alexnet

4.1.4. Análisis estadístico.

Las imágenes obtenidas se redimensionaron cada una a 277×277 píxeles, fueron divididas aleatoriamente en cinco segmentos. Los segmentos obtenidos se emplearon para modelar, testear y validar la RNC.

Este proceso se repitió cien veces a fin de evaluar la robustez del método, calculando para tal efecto las matrices de confusión, Figura 9, y sus respectivos estadísticos de clasificación, véase las ecuaciones 6 a 9.

		Positivo	Negativo
Valores predichos	Positivo	TP	FP
	Negativo	FN	TN
		Valores reales	

Figura 9. Matriz de confusión

Exactitud (EXC)

$$= \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (6)$$

$$\text{Sensibilidad (SEN)} = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (7)$$

$$\text{Precisión (PRE)} = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (8)$$

$$\text{Medida F (MEF)} = 2 \frac{(PRE \times REC)}{(PRE + REC)} \quad (9)$$

El detalle general de la aplicación se puede ver en la Figura 10 mostrada a continuación:

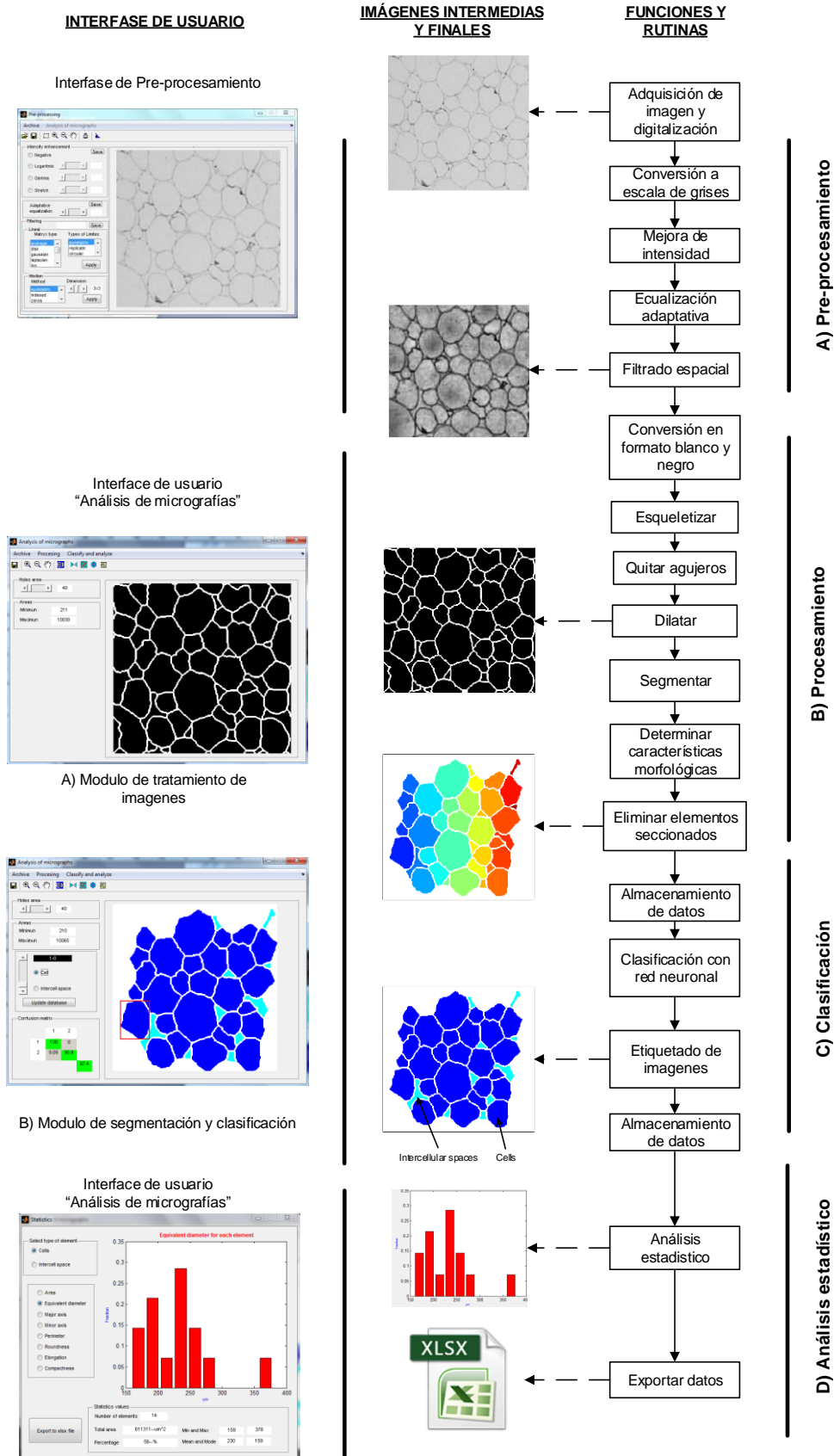


Figura 10. Esquema general de la aplicación: módulos y rutinas, funciones y guías más importantes.

4.2. Validación de software

En la Figura 11 se observa parte de una micrografía o imagen inicial (4.a). Asimismo, las imágenes resultantes de aplicar las funciones de realce (4b), esqueletizado (4c) y etiquetado (4.d). La imagen final de este proceso (4.d) es la imagen para usar en el proceso de clasificación manual; por esta razón es necesario extraer los elementos presentes en la Figura 11 evitando perder información a usar en el entrenamiento de la RNC.

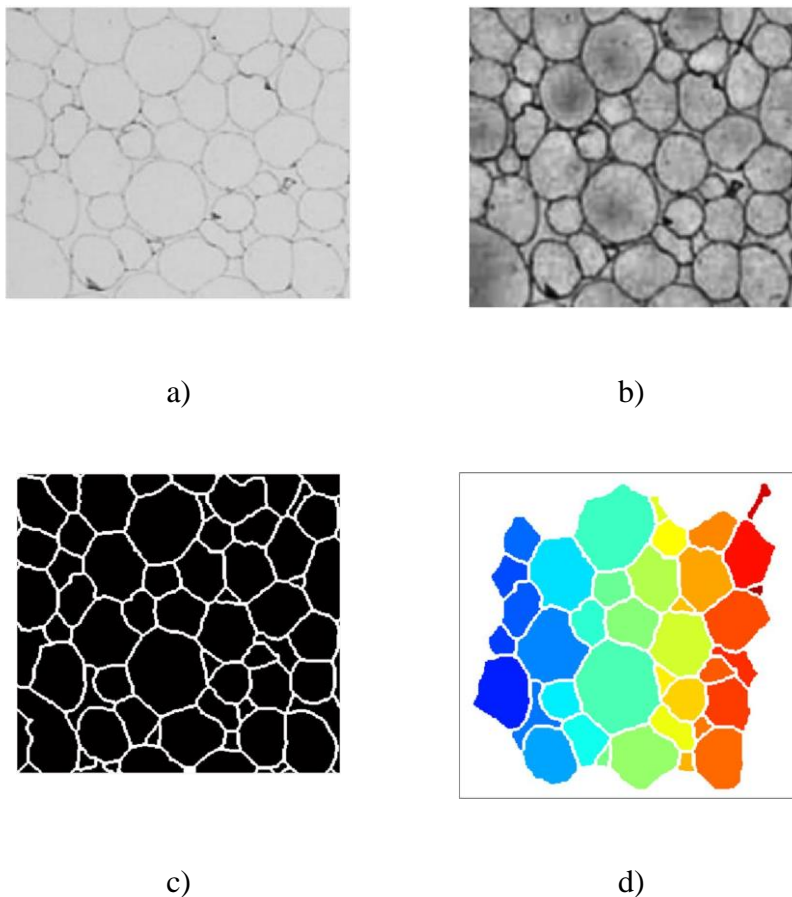


Figura 11. Resultados del procesamiento de una micrografía

Si bien es cierto las imágenes obtenidas permitieron una identificación visual de las estructuras celulares, de acuerdo con las condiciones de extracción de las micrografías los parámetros de procesamiento: tipo de filtro,

número de aplicaciones, dimensiones de la máscara de convolución, entre otras puede variar a fin de incrementar la información a extraer de una micrografía en específico.

Las Figura 12.a y 12.b muestran ejemplos de los elementos estructurales clasificados manualmente. El número de estos fue 685 y 610, células y espacios intercelulares respectivamente. Aunque el número de elementos a utilizar para el entrenamiento y validación de la RNC es pequeño, comparado con los usados por (Pieczywek & Zdunek, 2012) y (Kraus et al., 2016), es suficiente para evaluar la viabilidad del uso de las RNC en la discriminación de estructuras.

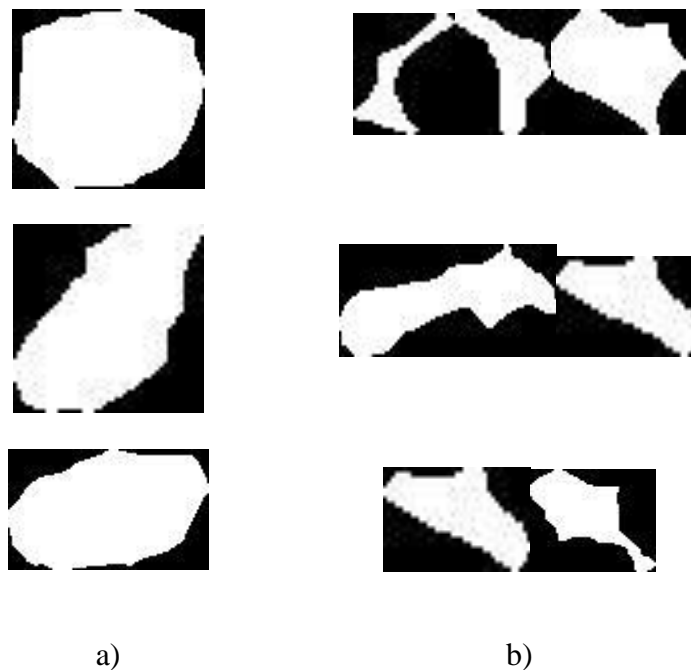


Figura 12. Imágenes de a) células b) espacios

Se desprende de las figuras antes mencionadas que la clasificación realizada por el operador se puede basar en las características morfogeométricas. Algunas de las principales características se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Información set células / espacios intercelulares

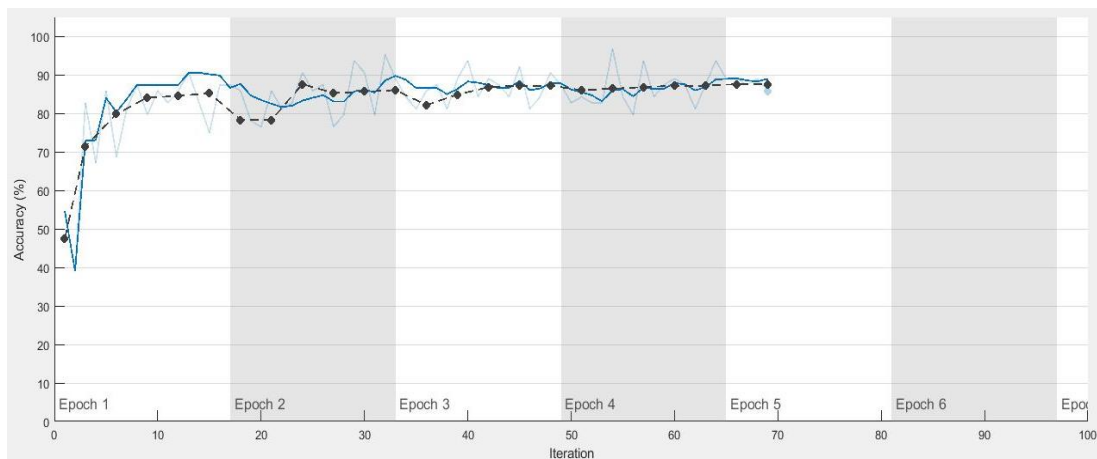
Ítem	Área *	Diámetro*	Redondez	Compacidad
Célula	1902 +/- 1080	47.22 +/- 13.87	140.60 +/- 40.67	1.36 +/- 0.28
Espacio	1037 +/- 1573	31.32 +/- 18.44	78.28 +/- 40.58	1.95 +/-0.84

* Unidades en pixeles

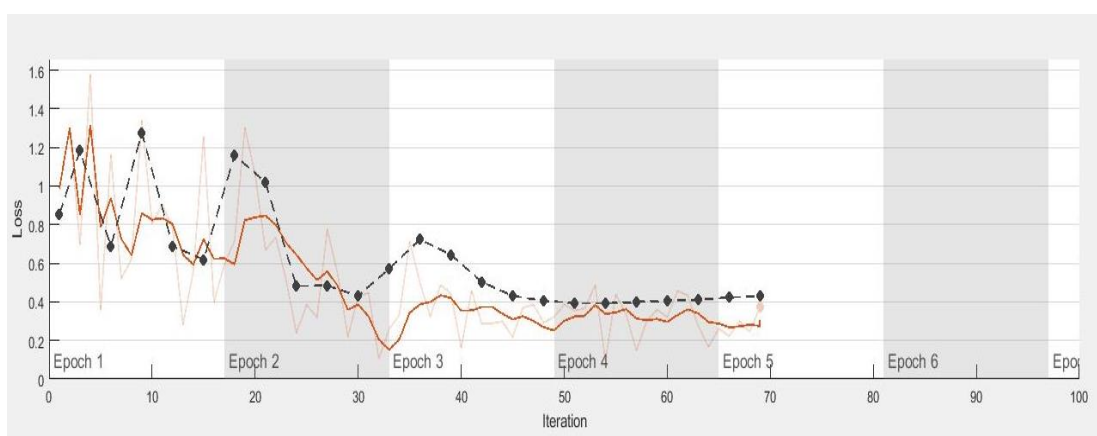
Se observa que no hay diferencias sensibles entre los elementos estructurales en los parámetros Área y Diámetro. Sin embargo, parámetros relacionados con la forma como Redondez y Elongación muestran diferencia de los parámetros por clase de hasta el 50%.

La Figura 13 presenta los resultados, exactitud (13.a) y error (13.b), del proceso de entrenamiento de la RNC en una de las cien iteraciones promediadas a fin de determinar la precisión del sistema.

Como se observa la validación alcanza valores de exactitud estables a partir de la tercera época de 87 %. Esto como menciona (Baker et al., 2018) es posiblemente debido a que las RNC cuando usan exclusivamente la silueta de los objetos, obviando las texturas, tienden a mayor error.



a)



b)

Figura 13. Precisión (a) y Error (b) en el entrenamiento de RNC

El análisis de los resultados obtenidos en las cien repeticiones es mostrado en la Figura 14. El valor obtenido para cada uno de los estadísticos se muestra fue: $EXC = 0.858 \pm 0.012$, $SEN = 0.829 \pm 0.022$, $PRE = 0.924 \pm 0.032$ y $MEF = 0.873 \pm 0.011$.

En consecuencia, el uso de la técnica RNC muestra el potencial de discriminación de elementos microestructurales en el tejido de origen vegetal.

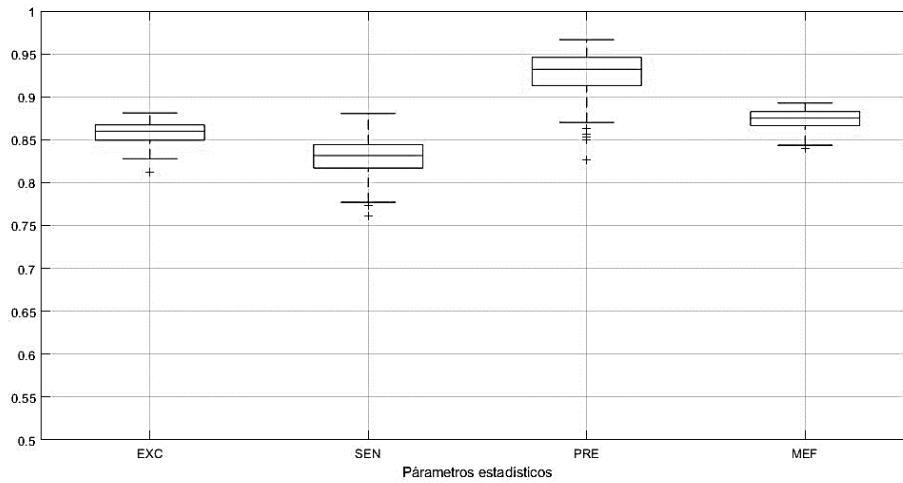


Figura 14. Estadísticos de la identificación usando RNC

El lenguaje usado en la programación en Matlab se encuentra en el Anexo 01 y el detalle de los Guide generados en el análisis de las células de patata se muestra en el Anexo 02.

Capítulo 5

Resultados y discusión

5. Resultados y discusiones

5.1. Características microestructurales de variedades de patata

Se evaluaron las 180 células por cada tratamiento (3 temperaturas y 3 tiempos) haciendo un estudio de 1620 células por cada variedad de patata evaluada. Las operaciones de adquisición y preprocesamiento de imágenes se implementaron con éxito usando el sistema generado para el análisis de la microestructura mostrado en el capítulo 4 de la presente tesis.

La Figura 15 muestra el procesamiento de las imágenes que implicó el reconocimiento y la interpretación de las características de la imagen, que implicó generar operaciones para identificar objetos clasificándolos en diferentes categorías.

El clasificador diseñado siguió un entrenamiento supervisado, y se pudo implementar los algoritmos de clasificación mediante la comparación directa de las características medidas, esta metodología ya ha sido usada con los valores de umbral de referencia (Kraus et al., 2016).

El principal problema de la segmentación en el análisis de alimentos es que la microestructura de los alimentos es intrínsecamente compleja y difícil de segmentar automáticamente debido a la gran variación de tonos de gris que suele encontrarse en las imágenes (Parada & Aguilera, 2007), el software usado mejoró este aspecto en las muestras de patata frita tal como se observa en la Figura 15.

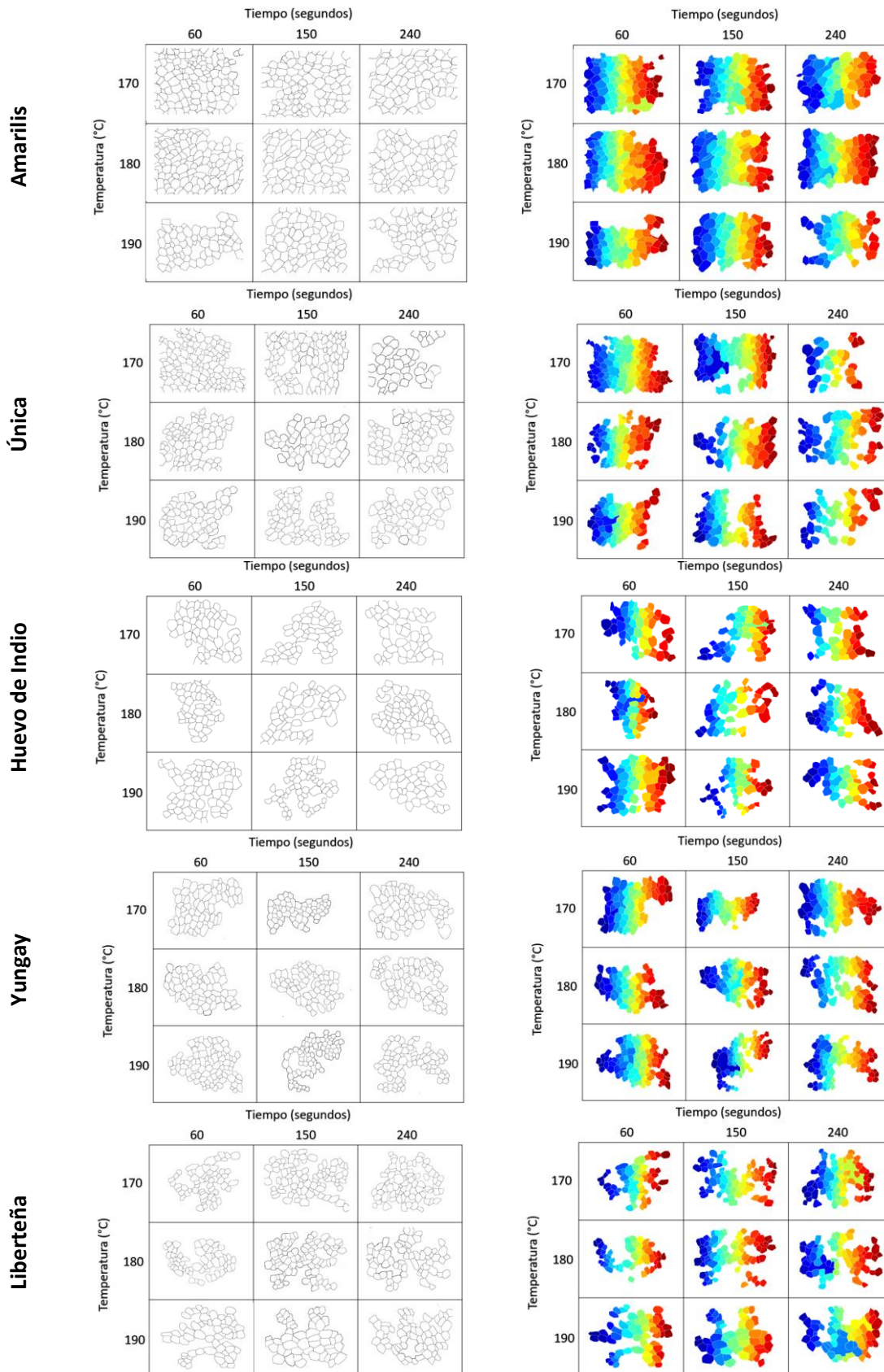


Figura 15. Imágenes de células de patata

La segmentación manual, que se realiza en el análisis de imágenes para la estructura de los alimentos, tiene la ventaja de ser más precisa que los procedimientos automáticos, porque un operador humano está mucho mejor capacitado para discriminar objetos en una imagen basada en información visual que una máquina. Sin embargo, la segmentación manual es más lenta y está sujeta a fuertes sesgos. Los métodos automáticos, sin demasiada interacción humana, son más adecuados para producir datos cuantitativos sin introducir sesgos. Tal como se muestra en la Figura 15 el procesamiento automático también tiene la ventaja de que las mediciones son más rápidas si hay una gran cantidad de imágenes para analizar.

Tras este análisis de la orientación celular generado por el software implementado, se estudiaron los parámetros microestructurales obtenidos de las células, los cuales son compactación, elongación, redondez, Longitud de eje mayor, Longitud de eje menor, perímetro y áreas. Para ello, se obtuvieron y analizaron varias muestras de diferentes partes de una misma patata frita, totalizando 1250 células por cada variedad.

Determinar la distribución estadística de los datos microestructurales es importante en una muestra tan grande de células de patata, en la Figura 16 se observan los histogramas de los parámetros de compactación, elongación, redondez, Longitud de eje mayor, Longitud de eje menor, perímetro y áreas celulares para los valores de las patatas fritas para las 5 variedades estudiadas. Se puede observar que el tamaño y forma de las curvas es similar para todos los parámetros y para todas las variedades, pero hay un desplazamiento de las curvas correspondientes a los parámetros de elongación y redondez, disminuyendo sus valores. Este cambio se puede atribuir al “efecto de corte”

que se produce en la preparación de las muestras cuando se utiliza el método de inclusión en resina.

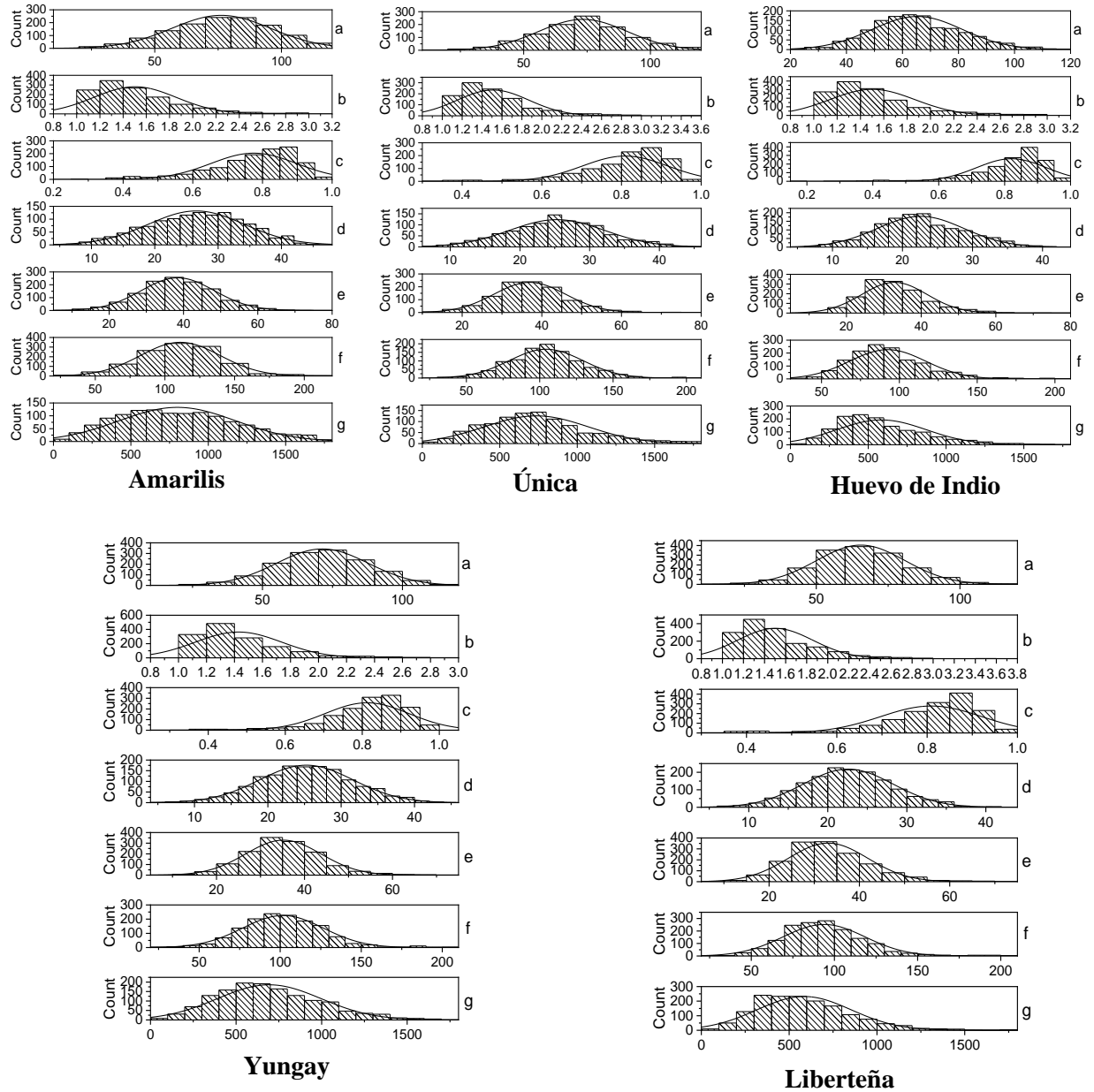


Figura 16. Histogramas de frecuencia y valores promedio (normalizados) de: (a) histogramas de compactación; (b) histogramas de elongación; (c) histogramas de redondez; (d) promedios de Longitud de eje mayor; (e) promedios de Longitud de eje menor; (f) promedios de perímetro y (g) promedio de área celulares.

La Tabla 5 muestra los valores promedio y de rango para los parámetros de compactación, elongación, redondez, longitud de eje mayor, longitud de eje menor, perímetro y áreas celulares obtenidos de muestras. Para ambos tipos de parámetros, los resultados son similares a los obtenidos en otros trabajos para otras hortalizas (Mayor et al., 2011; Reinheimer, 2012).

Tabla 5. Valores descriptivos de los parámetros microestructurales por variedad de patata

Variedad	Parámetro	Media	Desviación estándar	Mínimo	Mediana	Máximo
Amarilis	Área (μm^2)	819.882	82.608	653.256	808.928	942.622
	Perímetro (μm)	112.325	6.113	99.848	112.176	124.524
	L. eje mayor (μm)	39.013	2.650	33.476	38.947	44.196
	L. eje menor (μm)	26.811	1.321	24.113	26.790	29.487
	Redondez *	0.773	0.026	0.721	0.778	0.817
	Elongación *	1.508	0.074	1.395	1.483	1.672
	Compactación *	77.123	4.293	67.773	77.215	84.174
Única	Área (μm^2)	738.484	134.126	479.793	729.247	998.340
	Perímetro (μm)	104.368	9.936	82.442	104.848	123.226
	L. eje mayor (μm)	36.980	3.665	28.488	37.138	43.706
	L. eje menor (μm)	25.328	2.425	20.835	25.352	29.979
	Redondez *	0.807	0.022	0.770	0.806	0.856
	Elongación *	1.507	0.072	1.366	1.514	1.628
	Compactación *	73.364	6.996	58.524	73.519	86.750
Huevo de Indio	Área (μm^2)	600.472	153.001	472.383	527.276	966.528
	Perímetro (μm)	93.592	11.818	82.056	87.630	122.244
	L. eje mayor (μm)	33.256	4.221	29.268	31.090	43.574
	L. eje menor (μm)	22.797	2.732	19.962	21.754	29.187
	Redondez *	0.817	0.018	0.786	0.820	0.848
	Elongación *	1.503	0.040	1.425	1.506	1.589
	Compactación *	65.980	8.238	58.023	62.128	85.637
Yungay	Área (μm^2)	687.647	81.569	545.123	681.485	835.615
	Perímetro (μm)	101.425	6.360	91.983	100.032	113.144
	L. eje mayor (μm)	35.057	2.084	31.452	34.819	38.899
	L. eje menor (μm)	25.056	1.724	21.923	25.033	28.182
	Redondez *	0.806	0.028	0.739	0.808	0.859
	Elongación *	1.432	0.043	1.360	1.430	1.523
	Compactación *	70.918	4.529	62.230	70.621	79.099
Liberteña	Área (μm^2)	599.465	98.454	412.062	574.657	736.137
	Perímetro (μm)	94.866	8.120	77.367	94.677	106.628
	L. eje mayor (μm)	33.515	3.146	26.912	33.836	37.929

L. eje menor (μm)	22.785	1.720	19.264	22.413	25.309
Redondez *	0.805	0.021	0.771	0.806	0.849
Elongación *	1.504	0.058	1.389	1.503	1.616
Compactación *	66.216	5.588	54.636	65.850	74.240

- **Adimensional**

La Figura 17 muestra la comparación de los parámetros microestructurales de las cinco variedades de patata. Para este análisis se realizó una comparación múltiple usando la prueba de Tukey con un nivel de confianza simultáneo de 95%.

Al comparar el parámetro microestructural del área celular se determinó que este parámetro es diferente significativamente para cada variedad ($p < 0.05$); los valores de este parámetro para Amarilis – Única, Única - Yungay y Huevo de Indio – Liberteña son similares no logrando una diferencia significativa.

Al comparar el parámetro microestructural del perímetro celular se determinó que este parámetro es diferente significativamente para cada variedad ($p < 0.05$); los valores de este parámetro para la variedad Única – Yungay, Huevo de Indio – Liberteña y Yungay – Liberteña son similares no logrando una diferencia significativa.

Al comparar el parámetro microestructural de la longitud del eje mayor celular se determinó que este parámetro es diferente significativamente para cada variedad ($p < 0.05$); los valores de este parámetro para Amarilis – Única, Única – Yungay y Huevo de Indio – Liberteña son similares no logrando una diferencia significativa

Al comparar el parámetro microestructural de la longitud del eje menor celular se determinó que este parámetro es diferente significativamente para cada variedad ($p < 0.05$); los valores de este parámetro para Amarilis – Única,

Amarilis - Huevo de Indio, Amarilis – Liberteña, Única - Huevo de Indio, Única – Liberteña y Huevo de Indio – Liberteña son similares no logrando una diferencia significativa

Al comparar el parámetro microestructural de elongación celular se determinó que este parámetro es diferente significativamente para cada variedad ($p < 0.05$); los valores de este parámetro para Amarilis – Única, Única – Yungay, Huevo de Indio – Yungay, Huevo de Indio – Liberteña y Yungay – Liberteña son similares no logrando una diferencia significativa

Al comparar el parámetro microestructural de redondez celular se determinó que este parámetro es diferente significativamente para cada variedad ($p < 0.05$); los valores de este parámetro para Amarilis – Única, Única – Yungay y Huevo de Indio – Liberteña son similares no logrando una diferencia significativa

Al comparar el parámetro microestructural de compactación celular se determinó que este parámetro es diferente significativamente para cada variedad ($p < 0.05$); a diferencia del resto de parámetros en los valores de elongación la variedad Amarilis es la única diferente significativamente del resto de variedades.

Los valores obtenidos para los siete parámetros microestructurales están en los rangos encontrados en otros trabajos como en Calabaza (Mayor et al., 2011; Oblitas et al., 2021; Oblitas-Cruz et al., 2016),

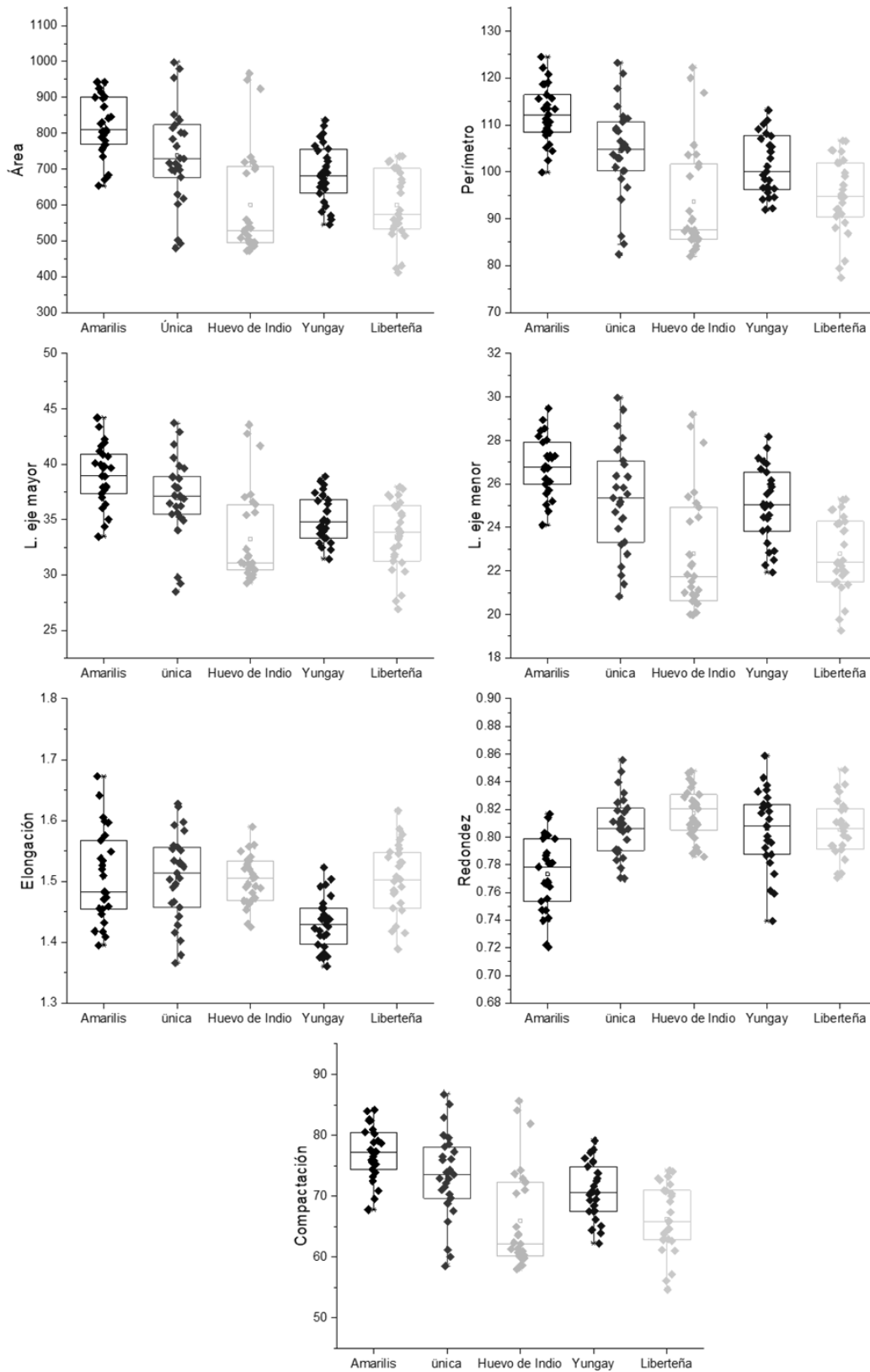


Figura 17. Comparación de parámetros microestructurales entre variedades de patata

5.2. Efecto sobre las características microestructurales en función a variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura

El proceso de fritura y los resultados de sus respuestas correspondientes se presentan en la Tabla 6, es primordial resaltar que estos valores son el promedio de las 150 células analizadas por cada tratamiento.

La regresión múltiple y el análisis de correlación se utilizan como herramientas para evaluar los efectos de dos o más variables independientes sobre las variables dependientes. El valor de probabilidad F y el valor de p se utilizaron como herramienta para verificar la importancia de cada uno de los coeficientes, para representarlo se usó el gráfico de Pareto para efectos estandarizados el cual se puede utilizar para encontrar los efectos de los factores y de la interacción. En otras palabras, se puede utilizar para obtener la magnitud y la importancia de un impacto (Lewins, 2004). El diagrama de Pareto generado para los valores microestructurales se muestra en la Figura 18, en ellos se observa los valores absolutos de los efectos estandarizados y la línea vertical indica el intervalo de confianza del 95 por ciento. Cualquier factor que cruce esta línea vertical es estadísticamente significativo.

Tabla 6. Diseño experimental y valores microestructurales obtenidos.

Factores			Respuestas						
X ₁ Variedad	X ₂ Tiempo (minutos)	X ₃ Temperatura (°C)	Área	Perímetro	Longitud eje mayor	Longitud eje menor	Redondez	Elongación	Compactación
1	60	170	670.5567	102.4924	34.36214	24.75161	0.767035	1.431812	69.56787
1	60	180	778.7811	112.176	38.90924	25.71727	0.741345	1.575019	75.10771
1	60	190	789.1995	108.5933	37.33563	26.80581	0.801681	1.446092	75.90008
1	150	170	754.2365	107.9129	36.9944	26.22888	0.786592	1.454673	74.38284
1	150	180	826.0299	113.4974	39.95997	26.67517	0.766743	1.566812	77.62968
1	150	190	897.1847	116.4844	40.8737	28.01399	0.78845	1.509309	80.89998
1	240	170	925.1365	122.2139	43.37621	27.92791	0.739614	1.64142	82.38961
1	240	180	830.3511	111.2648	38.94667	26.78988	0.784159	1.520331	77.21453
1	240	190	924.4684	118.6228	41.16652	28.94046	0.799106	1.455621	82.61293
2	60	170	784.368	109.3295	38.8823	25.84826	0.791001	1.553746	75.89477
2	60	180	618.0881	96.69513	34.94116	22.77852	0.798298	1.597704	67.54098
2	60	190	716.7646	103.6389	36.44863	25.35168	0.811328	1.503382	72.88058
2	150	170	695.0585	102.9035	37.16468	23.94395	0.790536	1.592501	71.49647
2	150	180	836.0298	111.8057	39.83832	27.06907	0.804003	1.529709	78.52216
2	150	190	492.4999	84.62561	29.24217	21.38695	0.831792	1.401984	60.07439
2	240	170	979.8213	120.9405	42.89507	29.42269	0.809701	1.505124	85.1404
2	240	180	715.7202	102.871	36.16949	25.07525	0.805753	1.495931	72.15564
2	240	190	823.3289	108.6694	38.00343	27.60529	0.83973	1.415482	78.09667
3	60	170	495.4678	85.71962	30.42495	21.122	0.82049	1.506765	60.26305
3	60	180	499.3857	85.76865	30.56917	20.61684	0.813515	1.520796	60.17357
3	60	190	706.6496	101.6473	36.36419	24.9359	0.830697	1.492245	72.26516
3	150	170	484.8932	84.22954	30.04276	20.53568	0.823605	1.505499	59.55956
3	150	180	484.9548	85.32615	30.51318	20.49105	0.80912	1.55983	59.82132

3	150	190	948.5991	119.9766	42.76591	28.64595	0.806618	1.528319	84.04868
3	240	170	527.2763	87.89182	30.98695	21.82916	0.831841	1.467992	62.35983
3	240	180	549.4546	89.95037	31.73949	22.33042	0.826448	1.463036	63.77379
3	240	190	720.0263	103.7583	36.58829	25.13672	0.810292	1.511323	72.92006
4	60	170	559.5592	94.59482	32.28544	22.50352	0.759021	1.475827	63.87803
4	60	180	661.2741	98.17643	34.19663	24.56904	0.818667	1.429515	69.4281
4	60	190	750.781	107.063	36.71823	26.6792	0.817456	1.396422	74.83075
4	150	170	707.5498	105.6546	35.74062	25.68307	0.781324	1.41281	72.49138
4	150	180	681.4851	99.26667	34.31207	25.06184	0.821827	1.418999	70.28962
4	150	190	649.5524	96.59325	33.72382	24.47364	0.842848	1.411313	69.28862
4	240	170	820.1146	111.0449	38.17762	27.65912	0.807676	1.410359	77.63143
4	240	180	775.7371	108.1139	37.77069	26.54748	0.808323	1.463967	75.72865
4	240	190	597.035	94.41907	33.31748	22.85091	0.813081	1.494681	66.16233
5	60	170	721.7177	104.6503	37.22528	24.80181	0.793801	1.539832	72.86306
5	60	180	689.3123	102.4663	36.53173	24.49674	0.804472	1.530828	71.88543
5	60	190	533.6261	90.4264	31.25106	21.99722	0.810774	1.455747	62.77804
5	150	170	574.657	94.48097	33.28073	22.06386	0.791084	1.524773	64.66292
5	150	180	563.1234	93.40243	33.50817	21.80147	0.79424	1.586124	64.62851
5	150	190	422.9743	79.41611	27.62457	19.77389	0.833076	1.425607	56.08274
5	240	170	722.4822	104.5896	37.07935	24.83915	0.793552	1.547862	72.67706
5	240	180	651.2336	97.18384	34.73195	23.82903	0.822559	1.502738	69.09789
5	240	190	528.4929	89.14579	31.09921	21.9362	0.820546	1.452479	62.63877

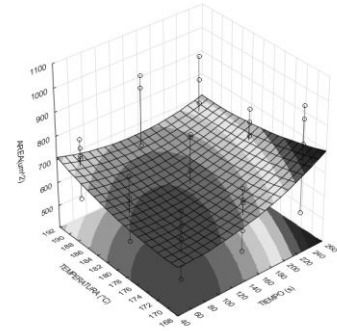
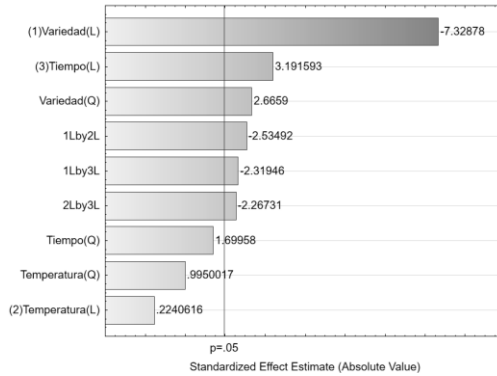
Variedad: (1) Amarilis, (2) Única, (3) Huevo de Indio, (4) Yungay y (5) Liberteña

Parámetro

Efecto Estandarizado

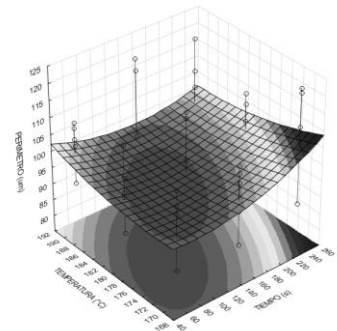
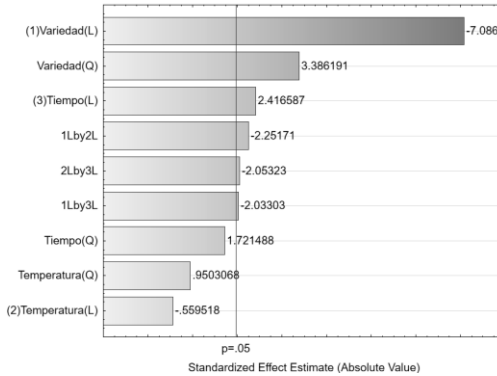
Superficie de respuesta (temperatura vs tiempo)

Área



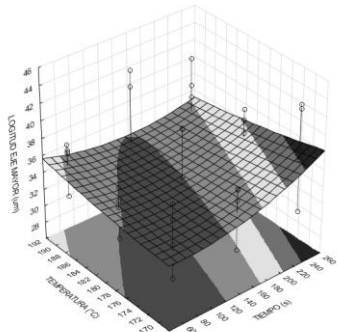
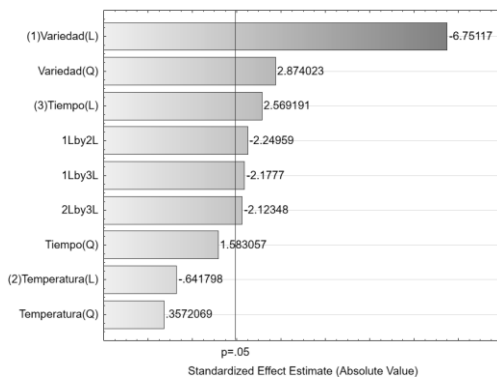
> 700
< 620

Perímetro



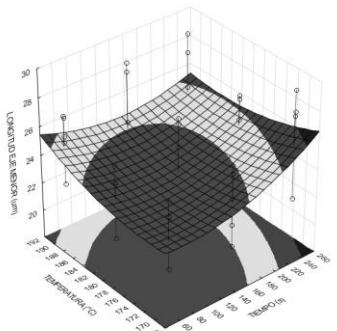
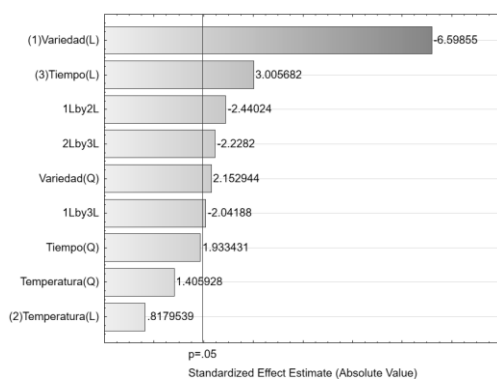
> 105
< 101
< 96

L. eje mayor



> 38
< 38
< 37
< 35
< 34

L. eje menor



> 26
< 26
< 25
< 24

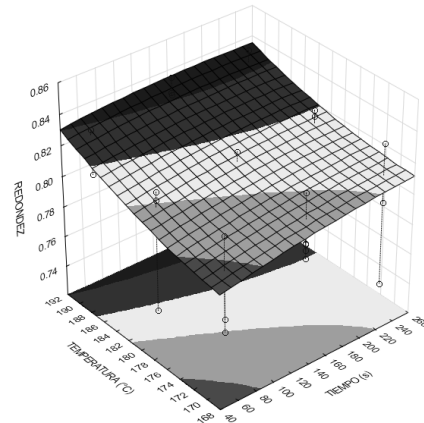
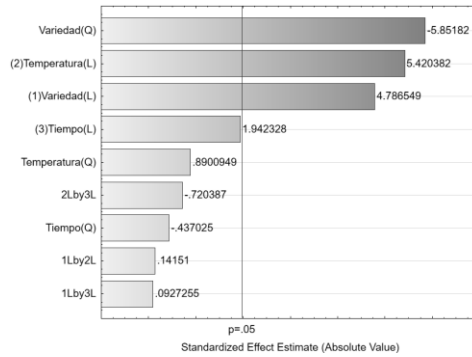
Figura 18. Gráfico de Pareto de efecto estandarizado y superficies de respuesta

Parámetro

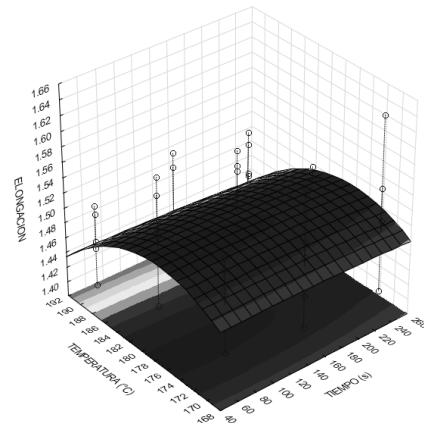
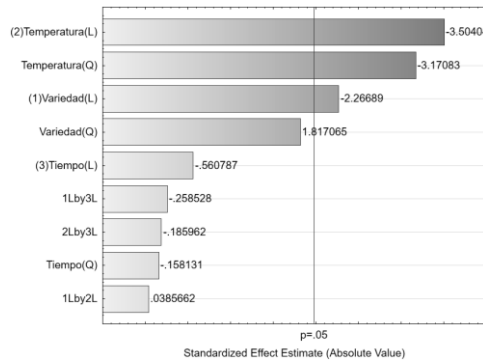
Efecto Estandarizado

Superficie de respuesta (temperatura vs tiempo)

Redondez de células



Elongación



Compactación

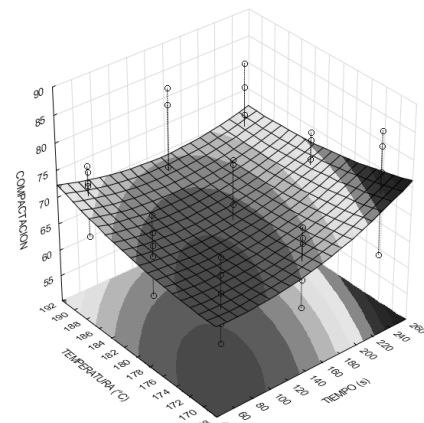
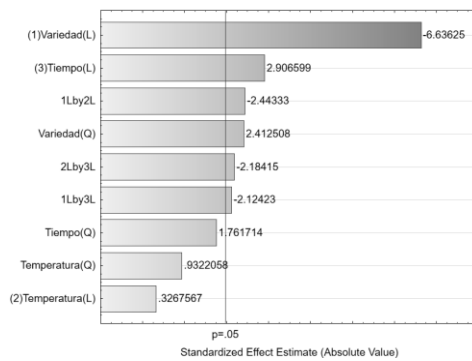


Figura 18. Gráfico de Pareto de efecto estandarizado y superficies de respuesta (continuación)

El diagrama de Pareto mostrado en la Figura 18 muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño. Se determinó que la variedad de patata es el que ejerce un mayor efecto significativo en los parámetros microestructurales de área, perímetro, longitud eje mayor, longitud eje menor, redondez, y compactación ($p < 0.05$). El tiempo es la segunda variable con mayor efecto, siendo significativo ($p < 0.05$) para los parámetros microestructurales de área, perímetro, longitud eje mayor, longitud eje menor y compactación. Finalmente, la temperatura solo ejerce un efecto significativo ($p < 0.05$) en los parámetros de redondez y elongación.

Los coeficientes de determinación (R^2) para las respuestas Área, perímetro, longitud eje mayor, longitud eje menor, redondez, elongación y compactación son 73.1%, 73.9%, 73.4%, 71.8%, 71.3%, 77.1% y 81.3% respectivamente. Los valores son bastante altos para las superficies de respuesta e indicaron que los modelos cuadráticos ajustados representaron entre el 71.1% al 81.3% de la varianza en los datos experimentales, que resultaron ser significativos; estos valores se deberían a la gran variabilidad en los datos de las células.

Se evaluaron los coeficientes de las ecuaciones de regresión para las respuestas medidas, los términos lineales, cuadráticos y de interacción de las variables seleccionadas y los valores se muestran en la Tabla 7. Como se refleja en las ecuaciones, el signo y la magnitud de los coeficientes indican el efecto de la variable en la respuesta.

Tabla 7. Valores de R² y coeficientes para los modelos de predicción en parámetros microestructurales

Parámetro	Ecuación										R ²
	Parámetro = $a*V + b*T + c*t + d*V^2 + e*V*T + f*V*t + g*T^2 + h*T*t + i*t^2 + j$										
	Donde: T: Temperatura t: Tiempo V: Variedad										
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	
Área	266.81000	-60.20890	374.03300	15.11570	-2.08282	-12.70530	0.20027	-2.15114	15.20260	5193.27000	0.731
Perímetro	15.77350	-4.70394	25.94360	1.52897	-0.14732	-0.88659	0.01523	-0.15513	1.22612	471.13900	0.739
L. eje mayor	6.25688	-0.45751	9.91333	0.46474	-0.05271	-0.34007	0.00205	-0.05748	0.40415	56.43790	0.734
L. eje menor	5.10105	-1.68366	6.60119	0.22923	-0.03768	-0.21037	0.00532	-0.03977	0.32519	157.97300	0.718
Redondez	0.03755	-0.01456	0.02964	-0.00669	0.00004	0.00026	0.00004	-0.00013	-0.00069	1.90518	0.713
Elongación	-0.03778	0.12565	0.02410	0.00566	-0.00001	-0.00096	-0.00035	-0.00010	-0.00109	-9.56109	0.771
Compactación	14.37700	-3.04720	19.16590	0.74516	-0.10938	-0.63396	0.01022	-0.11294	0.85857	296.22900	0.813

Las Figuras 19, 20,21, 22 y 23 muestran los efectos principales por cada variedad donde los valores de temperatura y tiempo causan distintos efectos en las propiedades microestructurales siendo la elongación y la redondez los parámetros que más efectos diversos tienen por variedad.

Respecto a la variedad Amarilis se observa que la temperatura genera cambios aumentando las características de área, longitud del eje mayor, longitud del eje menor, perímetro, redondez y compactación; este comportamiento es similar al generado por la variedad Huevo de Indio cuando es afectado por la temperatura, si se analiza en estas dos variedades el efecto del tiempo se observa que la variedad Amarilis sufre un aumento positivo proporcional al tiempo mientras que la variedad huevo de indio no es afectada por el tiempo de manera significativa.

El comportamiento por efecto de la temperatura en las variedades Única, Yungay y Liberteña son similares debido a que sufren una reducción en los parámetros de área, longitud del eje mayor, longitud del eje menor, perímetro proporcional al aumento de la temperatura; en estas tres variedades los parámetros de redondez, elongación y compactación tienen una pequeña reducción conforme aumenta la temperatura.

El efecto del tiempo es similar en las variedades Única y Yungay donde el aumento de este parámetro genera aumento de las características de área, longitud del eje mayor, longitud del eje menor, perímetro, redondez, elongación y compactación. Asimismo, las variedades Huevo de Indio y Liberteña son las que no muestran cambio por efecto del tiempo.

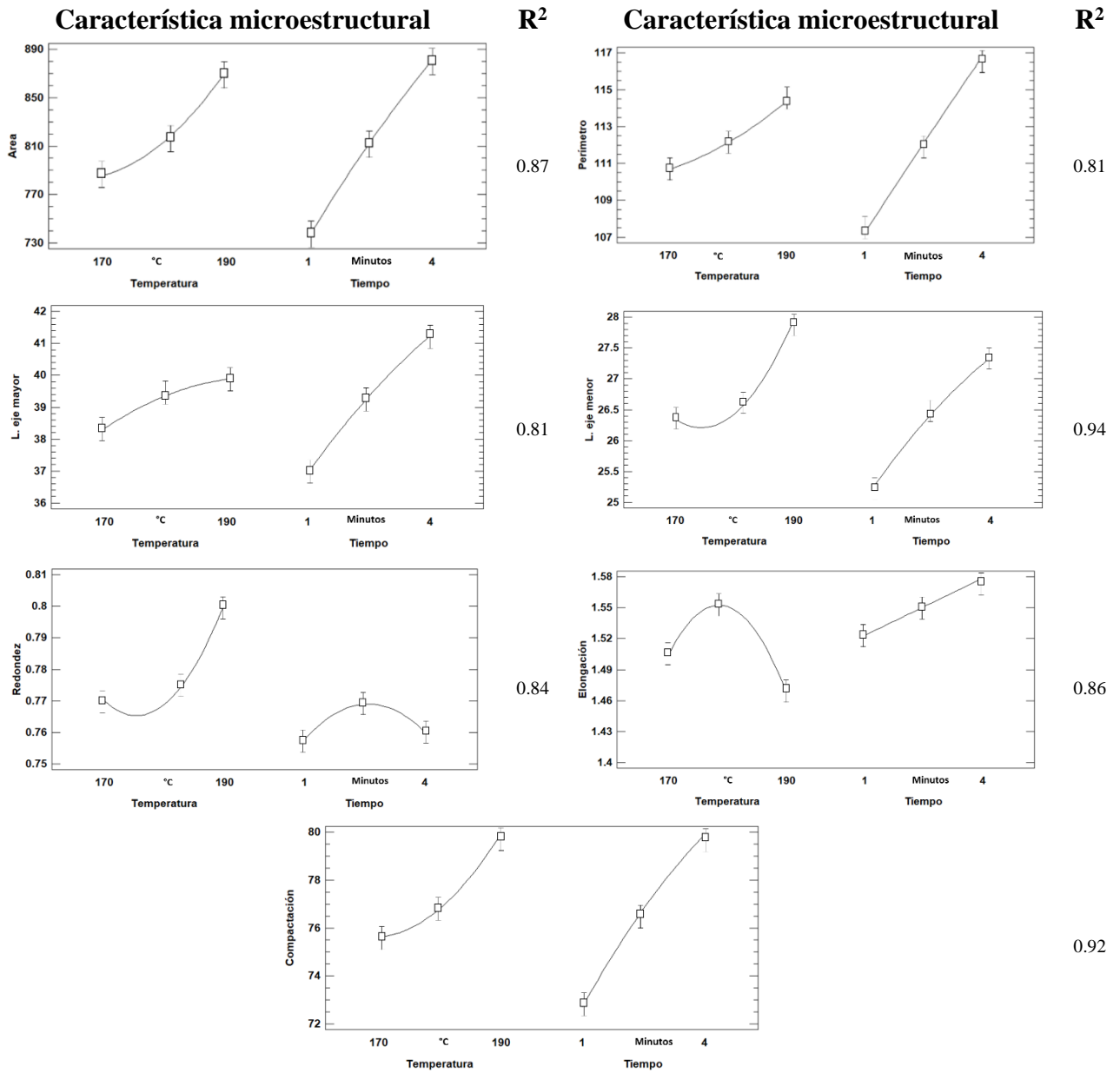


Figura 19. Gráfico de efectos principales para patata variedad Amarilis

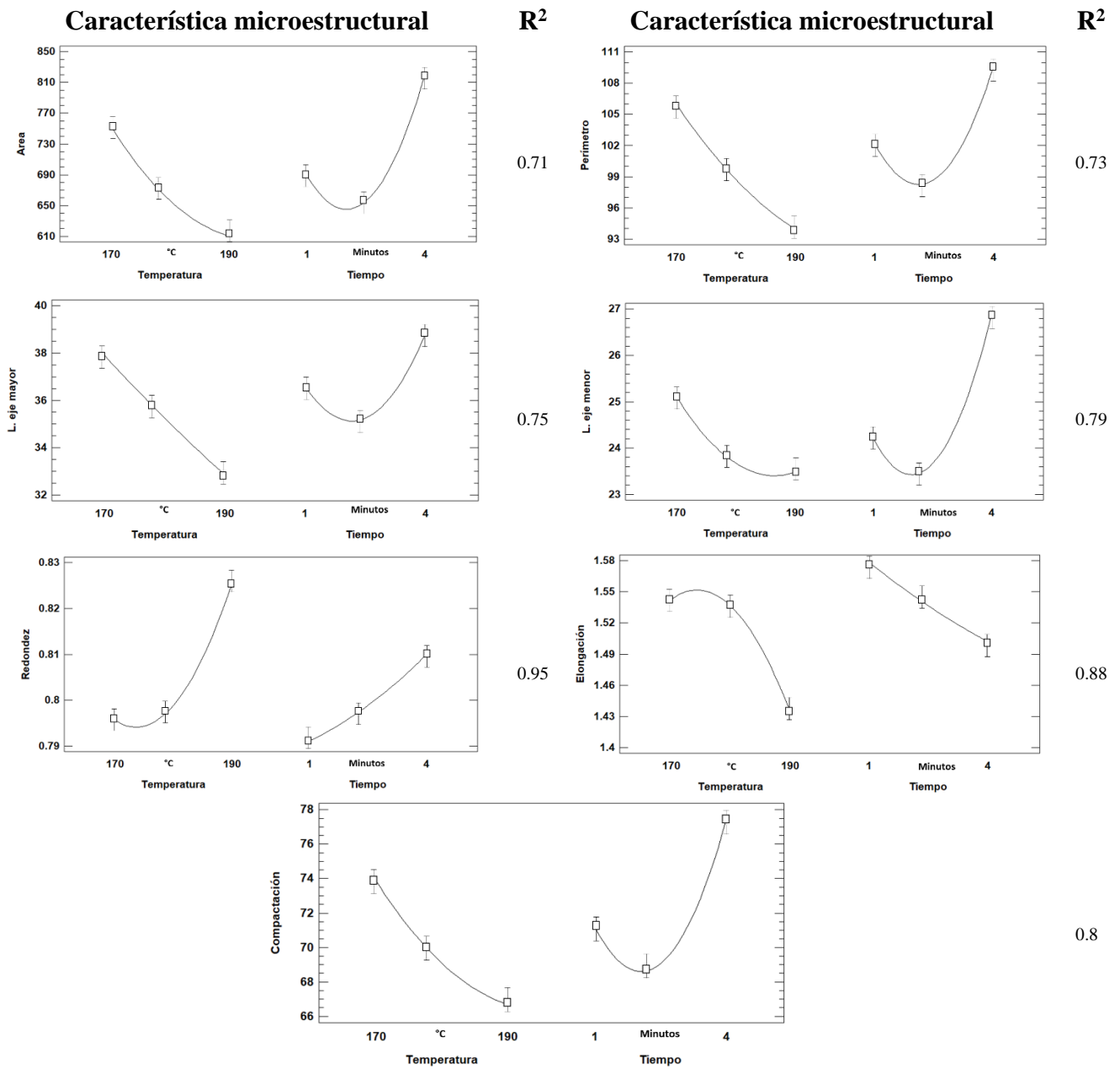


Figura 20. Gráfico de efectos principales para patata variedad Unica

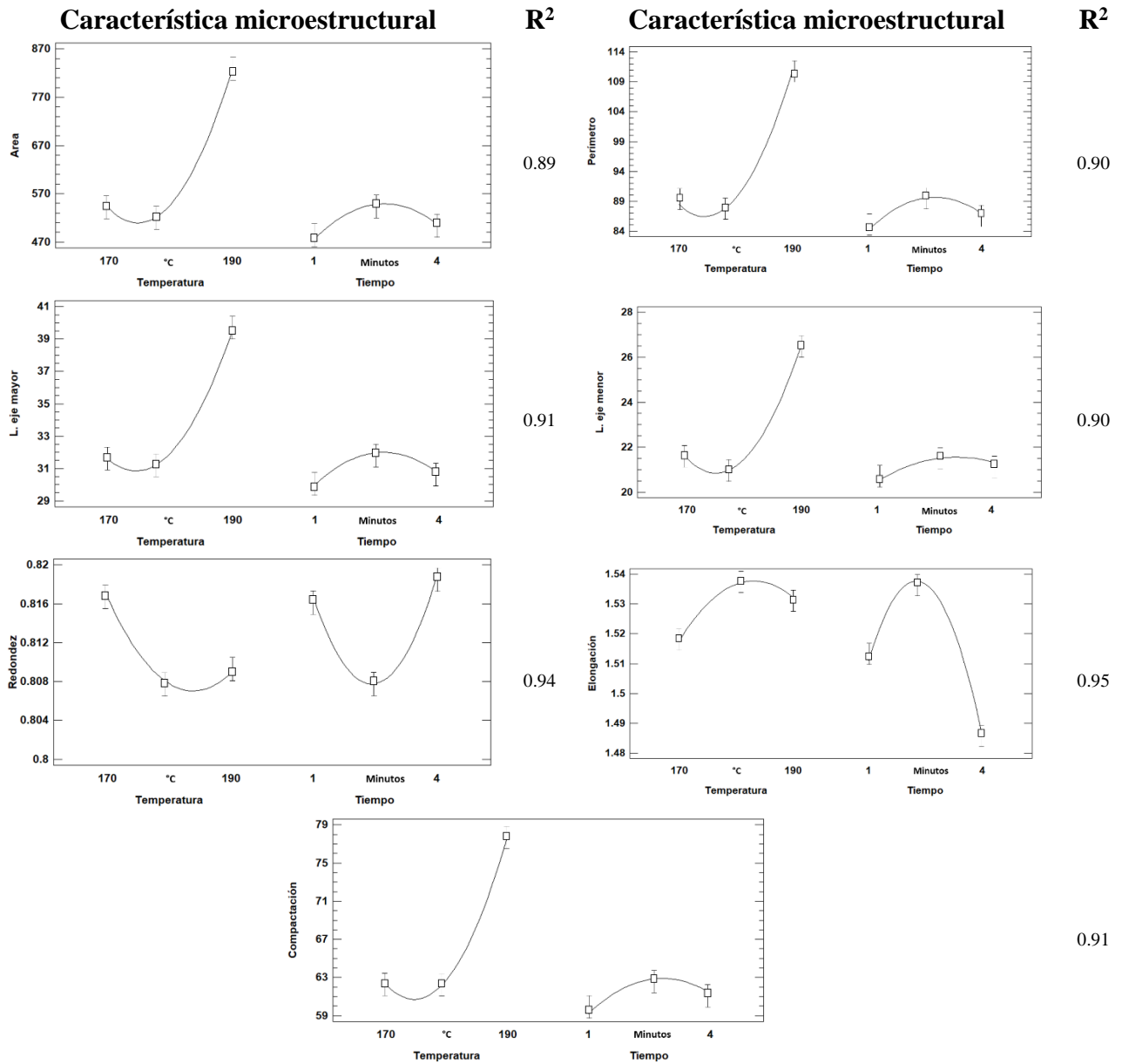


Figura 21. Gráfico de efectos principales para patata variedad Huevo de Indio

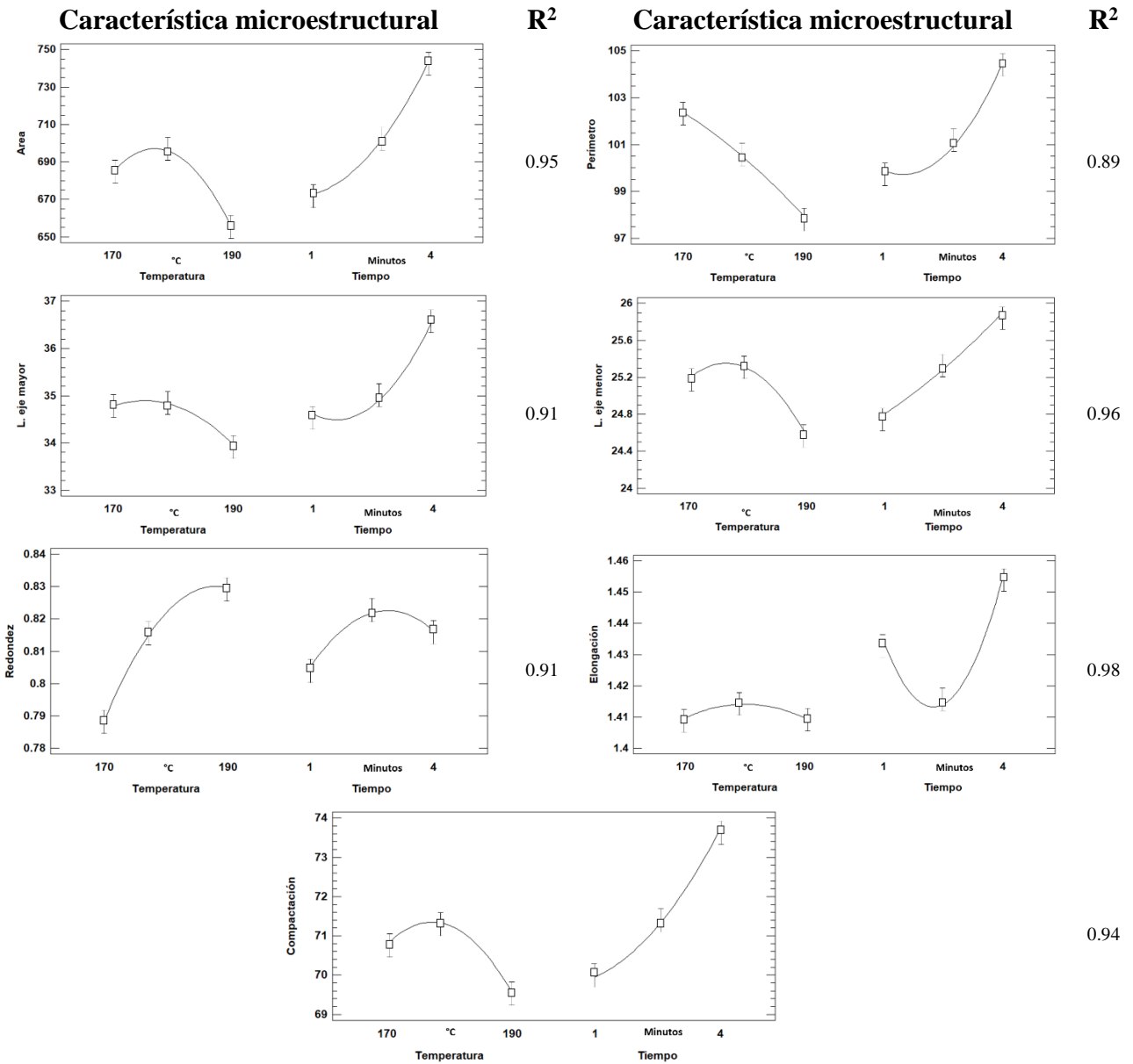
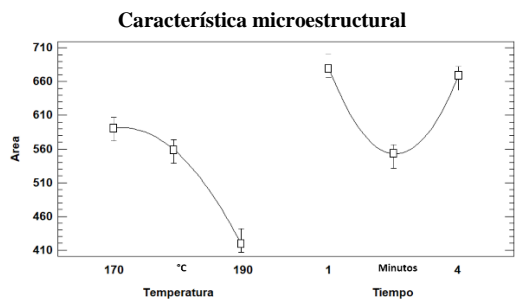
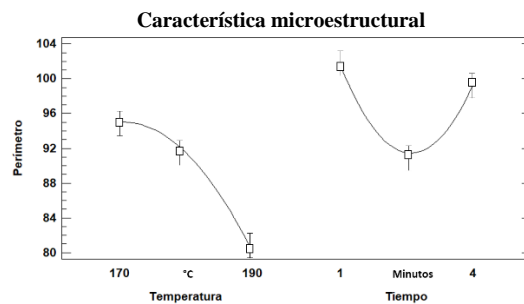


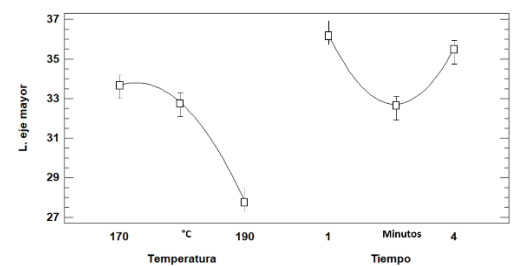
Figura 22. Gráfico de efectos principales para patata variedad Yungay



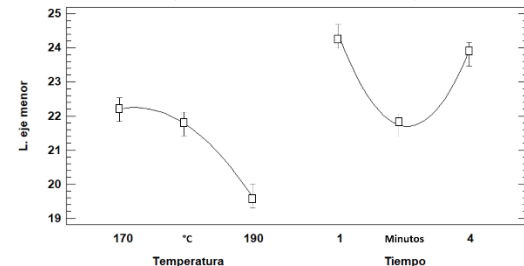
R^2
0.98



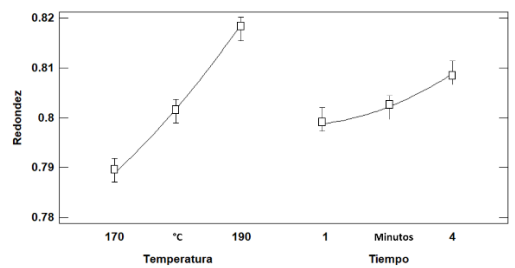
R^2
0.97



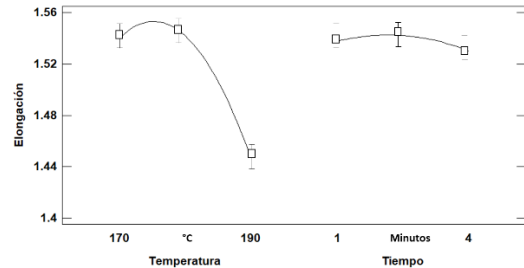
R^2
0.98



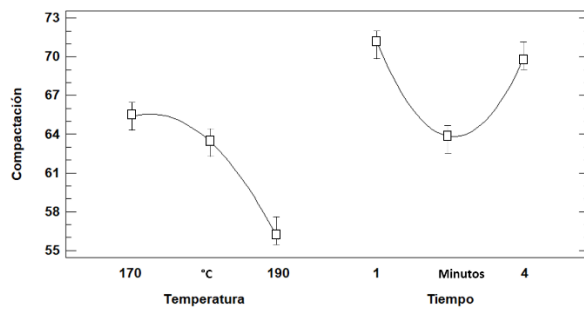
R^2
0.98



R^2
0.90



R^2
0.89



R^2
0.98

Figura 23. Gráfico de efectos principales para patata variedad Libertena

La microestructura alimentaria está relacionada necesariamente con las características tecnológicas de los alimentos, existe investigaciones como la de (Crafts, 1944) que ya reportaba que los niveles de contracción y cambio en las células de frutas causaban cambios en la dimensión de los productos. Otras investigaciones donde evaluaban el secado de frutas como la investigación de Ramos et al. (2003) donde evidenció que la contracción celular provoca modificaciones en la estructura global de los frutos y está directamente relacionada con la pérdida de agua durante el secado.

El avance de este tipo de trabajos que relacione a la microestructura con características tecnológicas en el procesamiento de alimentos se vio un poco limitado por los pocos indicadores microestructurales usados en este campo, que puedan medir y relacionar estas interacciones.

El desarrollo de indicadores microestructurales a partir de células de vegetales usando características geométricas de las células ha sido parte de diversos estudios (Allende et al., 2004; Derossi et al., 2017; Mayor et al., 2011) donde se ha demostrado que el área, diámetro equivalente, longitud del eje mayor, longitud del eje menor, perímetro, redondez, elongación y compactación obtenidos de las imágenes pueden representar el comportamiento microestructural de células vegetales. Los modelos presentados en estas investigaciones son modelos geométricos que representan la estructura del material biológico, pero que se observó que tienen deficiencias en encontrar relaciones estadísticas con el alimento que representan y esto porque las características usadas como el área encuentran valores idénticos, esto fue evidenciado en cada tipo de cultivar, zona de corte

para obtener la muestra, lo cual genera una representación de la microestructura a un nivel promedio.

Los resultados en la tesis sobre las variedades de patata, da un inicio diferente a un uso del modelo geométrico con mayor detalle, ya que el software diseñado para la investigación lo construye a partir de un conjunto de geometrías poligonales aproximadas en el límite de formas tomando nuevas variables relacionadas con áreas y su relación de aspecto y orientación, que junto con un sistema de inteligencia artificial puede discriminar mucho mejor las micrografías usadas, por lo que los resultados obtenidos pueden ser más representativos de la microestructura de la patata y de su efecto en el proceso de fritura.

Todo esto ha sido posible a la aplicación de técnicas computacionales como las redes neuronales convolucionales, el trabajo de (Biswas & Barma, 2020) muestra una aplicación de análisis de imágenes de microscopía mediante el empleo de técnicas de aprendizaje automático la cual avanza en la comprensión crítica de varias características de las células biológicas, que van desde la visualización de estructuras biológicas hasta la cuantificación de fenotipos.

Este paso inicial es importante ya que puede representar con mayor exactitud los tejidos, pero es importante aclarar que esta aproximación está basada en un tejido homogéneo, en la tesis se puso cuidado en tomar las mismas zonas de muestra de las cinco variedades de patata para asegurar la homogeneidad de los valores.

5.3. Observación de la microestructura con microscopía electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope)

Con el fin de tener más información microestructural se sometió a las muestras a una observación con micrografías SEM, la Figura 24 muestra las patatas sin freír para las variedades Amarilis, Única, Huevo de Indio, Yungay y Liberteña con el fin de distinguir los efectos de la fritura.

Las morfologías de las cinco variedades de patatas sin freír, caracterizada por la presencia de gránulos y una morfología propia de cada variedad caracterizada por el tamaño y forma de las paredes celulares que forman una estructura porosa. La morfología de la variedad de patata Amarilis está caracterizada por poca cantidad de gránulos distribuidos de manera aleatoria y de tamaños pequeños. La variedad de la patata Única está caracterizada por una mayor abundancia de gránulos de variados tamaños, siendo más grandes en comparación con las demás variedades. En la variedad de patata Huevo de Indio, la estructura porosa es caracterizada por una menor cantidad de gránulos de tamaño más uniforme. Finalmente, la variedad de patatas Yungay y Liberteña se observa una mayor porosidad de las paredes celulares alargadas caracterizada por una menor cantidad de gránulos en comparación con las demás variedades.

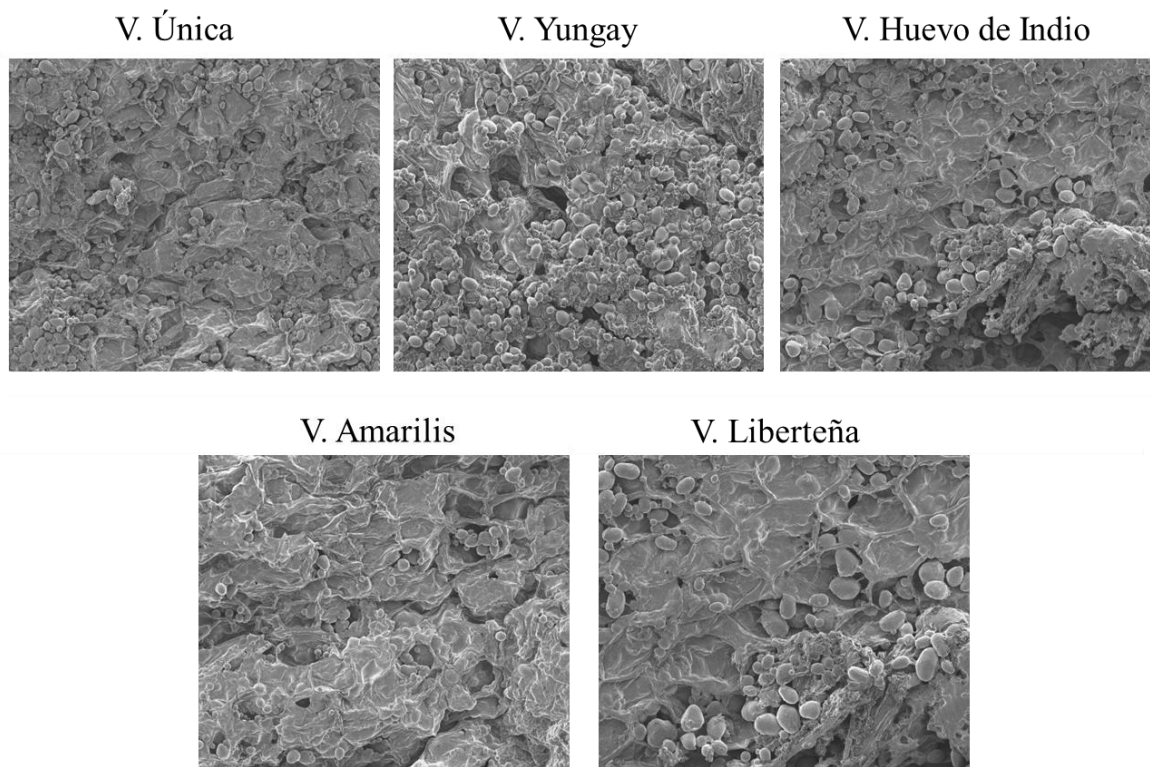


Figura 24. Micrografía SEM correspondiente a las muestras de patatas sin freír

En las Figuras 25, 26, 27, 28 y 29 se presentan micrografías SEM de la parte interna (núcleo) de las muestras de patata para las variedades Amarilis, Única, Huevo de Indio. Yungay y Liberteña respectivamente. Las micrografías SEM fueron realizadas con una magnificación de 200X. En cada figura, se observan las micrografías de cada variedad para distintas temperaturas y tiempos de fritura.

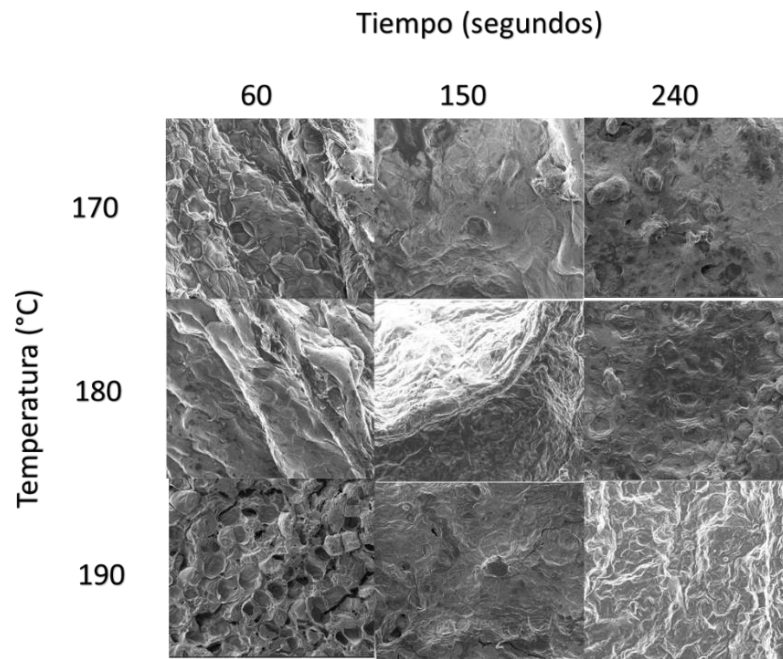


Figura 25. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Única

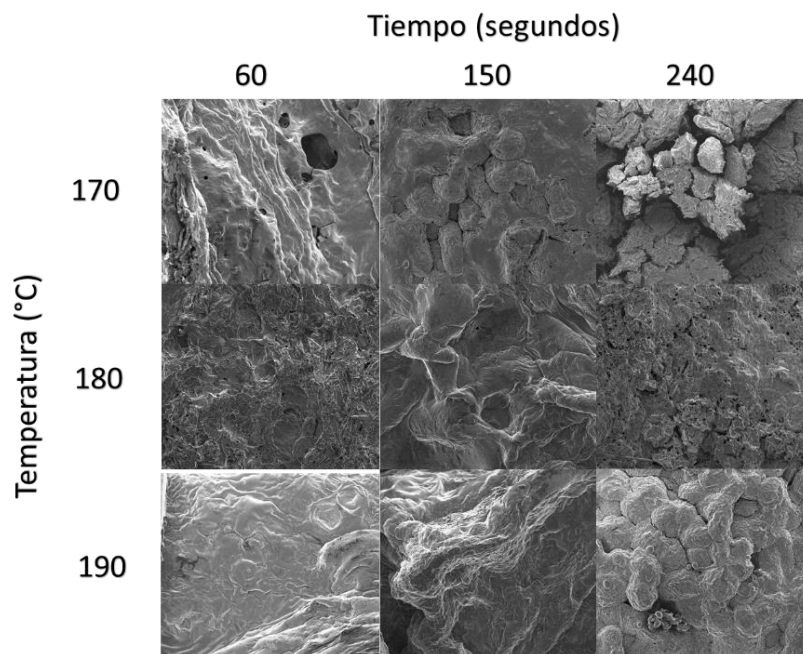


Figura 26. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Yungay

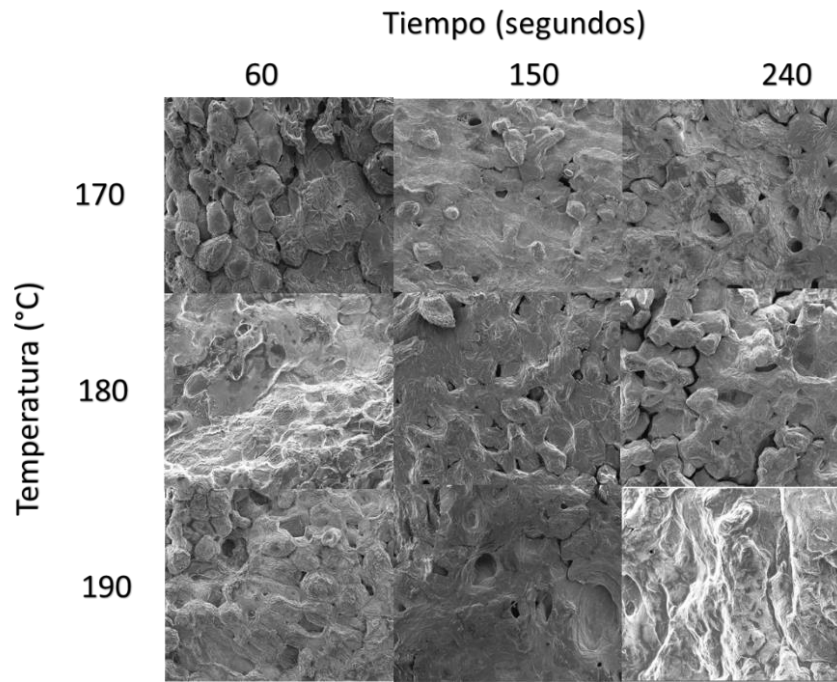


Figura 27. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Huevo de Indio

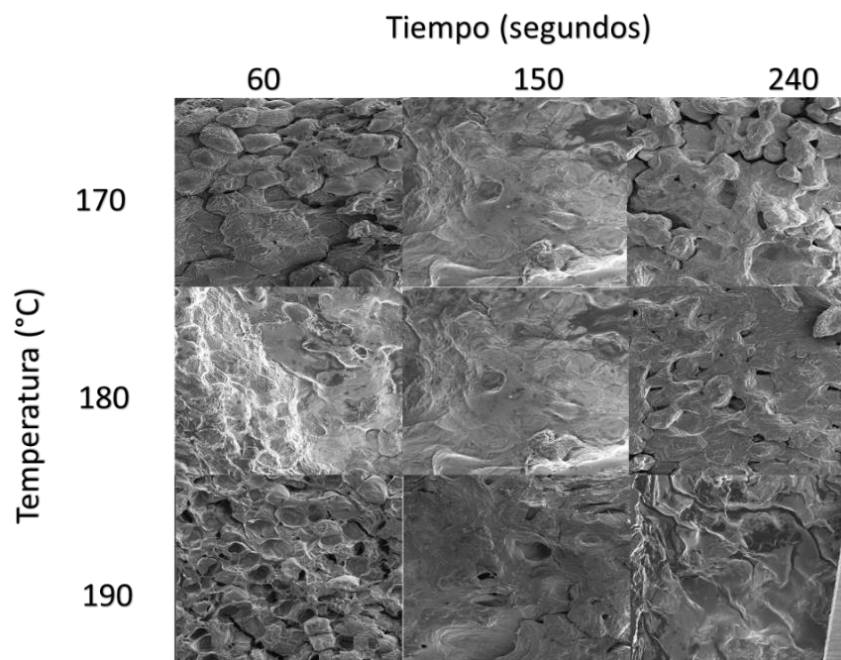


Figura 28. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Libertea

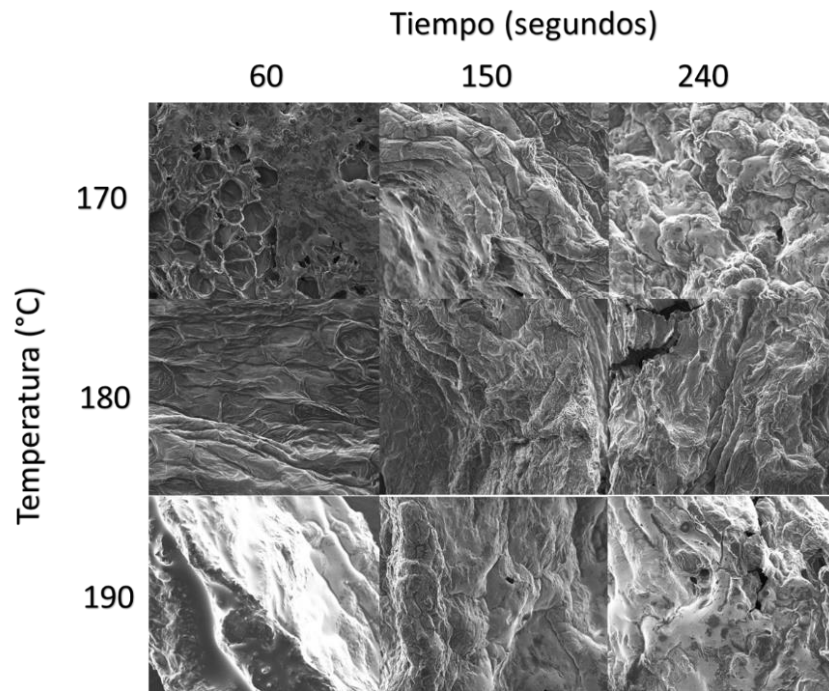


Figura 29. Micrografía SEM correspondiente a la parte interna (núcleo) de las muestras de patatas de la variedad Amarilis

En la Figura 25 se muestra la morfología interna de la variedad Única expuesta a diferentes temperaturas y tiempos. En comparación con la muestra sin freír, hay una disminución de las zonas huecas de la estructura porosa, probablemente producida por el proceso de gelatinización del almidón que implica la ruptura de los enlaces intermoleculares de las moléculas de almidón debido al calor. Además, cuando el tiempo de fritura y la temperatura se incrementa, se observa que la morfología sufre cambios tal como la pérdida de los contornos individuales de los gránulos para dar lugar a una unión de los gránulos incluso con las paredes celulares, probablemente causada por una mayor adsorción y difusión del aceite debido a un mayor tiempo de fritura.

En la Figura 26 se muestra la morfología interna de la variedad Yungay expuesta a diferentes temperaturas y tiempos. En comparación con la muestra

sin freír, hay una disminución notoria de los gránulos individuales. Por otro lado, si se mantiene constante el tiempo de fritura y aumenta la temperatura de fritura, se observa que la morfología interna se va fusionando, disminuyendo el grado de porosidad. Además, el aumento del tiempo de fritura ocasiona una pérdida gradual de la textura.

En la Figura 27 se muestra la morfología interna de la variedad de patata Huevo de Indio expuesta a diferentes temperaturas y tiempos. Similar a la muestra anterior, hay una disminución notoria de los gránulos individuales. Al aumentar la temperatura para el tiempo de fritura de 1 min, se observa un aumento en la porosidad, caracterizada por espacios huecos de forma poligonal. No obstante, esta tendencia disminuye a medida que el tiempo de fritura aumenta, probablemente debido a la adsorción y difusión del aceite de girasol dentro de la estructura.

En la Figura 28 se muestra la morfología interna de la variedad Libertaña expuesta a diferentes temperaturas y tiempos. En comparación con la muestra sin freír, hay una disminución notoria de los gránulos individuales. Con respecto a la variedad Amarilis mostrado en la Figura 29 es similar a la variedad Libertaña. El aumento del tiempo de fritura causa un aumento en la porosidad. No obstante, un aumento en la temperatura de fritura ocasiona una fusión de las características superficiales, probablemente producido por la degradación de la patata.

El comportamiento de las 5 variedades sigue el comportamiento de estudios en variedades similares como la variedad Helan (Yang et al., 2019), donde se reporta la forma poligonal de las células frescas y el cambio en base

al tiempo donde generó grietas y rotura celular en tiempos cercanos a 240 segundos.

Además, las formas poligonales se perdieron en las primeras muestras esto debido a la gelatinización del almidón en patata, siendo mayor este cambio en patatas con mayor contenido de almidón, esto también fue reportado por (Dhital et al., 2018) el cual atribuye estos cambios a que los almidones experimentan una gelatinización que corresponde a una pérdida de orden estructural de los mismos.

5.4. Efecto de las variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura sobre las características fisicoquímicas.

El proceso de fritura y los resultados de sus respuestas correspondientes se presentan en la Tabla 8, es primordial resaltar que estos valores son el promedio de las 3 repeticiones llevadas a cabo por cada muestra.

La regresión múltiple y el análisis de correlación se utilizan como herramientas para evaluar los efectos de dos o más variables independientes sobre las variables dependientes. El valor de probabilidad F y el valor de p se utilizaron como herramienta para verificar la importancia de cada uno de los coeficientes, para representarlo se usó el gráfico de Pareto para efectos estandarizados el cual se puede utilizar para encontrar los efectos de los factores y de la interacción. En otras palabras, se puede utilizar para obtener la magnitud y la importancia de un impacto (Lewins, 2004). El diagrama de Pareto generado para los valores microestructurales se muestra en la figura 30, en ellos se observa los valores absolutos de los efectos estandarizados y la

línea vertical indica el intervalo de confianza del 95 por ciento. Cualquier factor que cruce esta línea vertical es estadísticamente significativo.

Los coeficientes de determinación (R^2) para las respuestas L^* , a^* , b^* , ΔE , acrilamida, grasa y humedad son 76.13%, 86.9%, 82.5%, 78.3%, 94.2%, 96.4% y 98.6% respectivamente. Los valores son bastante altos para las superficies de respuesta e indicaron que los modelos cuadráticos ajustados representaron entre el 71,1% al 81.3% de la varianza en los datos experimentales, que resultaron ser significativos. Se evaluaron los coeficientes de las ecuaciones de regresión para las respuestas medidas, los términos lineales, cuadráticos y de interacción de las variables seleccionadas y los valores se muestran en la Tabla 9. Como se refleja en las Ecuaciones, el signo y la magnitud de los coeficientes indican el efecto de la variable en la respuesta.

Tabla 8. Diseño experimental y valores fisicoquímicos obtenidos.

Factores			Respuestas								
X ₁	X ₂	X ₃	L	a	b	ΔE	Acrilamida	Grasa	Humedad	Grasa	Textura
Variedad	Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)					(mg/Kg)	(%)	(%BH)	(%BS)	(N)
1	170	1	44.64	-1.92	11.18	46.06	0.02	4.20	68.40	36.20	2.20
2	170	1	48.3	-0.55	9.24	49.18	0.019	4.10	69.08	36.56	2.22
3	170	1	48.35	-0.99	9.4	49.27	0.018	4.20	69.15	36.60	2.22
4	170	1	53.9	-0.78	18	56.83	0.021	4.30	68.33	36.16	2.20
5	170	1	52.35	-1.07	17.29	55.14	0.02	4.10	69.02	36.53	2.22
1	180	1	44.84	3.02	16.82	47.99	0.02	1.50	59.20	31.20	2.50
2	180	1	51.05	0.1	13.15	52.72	0.019	1.60	59.79	31.51	2.53
3	180	1	48.02	-2.71	12.11	49.60	0.018	1.70	59.85	31.54	2.53
4	180	1	53.81	-1.55	13.43	55.48	0.021	1.40	59.14	31.17	2.50
5	180	1	46.04	-1.35	12.01	47.60	0.02	1.80	59.73	31.48	2.52
1	190	1	41.69	5.38	21.4	47.17	0.02	3.40	57.60	27.60	2.10
2	190	1	51.32	1.4	19.34	54.86	0.019	3.50	58.18	27.88	2.12
3	190	1	45.24	-0.82	12.51	46.94	0.018	3.50	58.23	27.90	2.12
4	190	1	53.81	-0.06	17.7	56.65	0.021	3.60	57.54	27.57	2.10
5	190	1	46.03	1.56	21.65	50.89	0.02	3.40	58.12	27.85	2.12
1	170	2.5	49.43	3.28	22.56	54.43	0.02	2.40	51.70	43.50	1.90
2	170	2.5	41.82	3.67	18.71	45.96	0.019	2.40	52.22	43.94	1.92
3	170	2.5	51.93	-1.68	12.77	53.50	0.018	2.40	52.27	43.98	1.92
4	170	2.5	62.17	-0.51	21.54	65.80	0.021	2.50	51.65	43.46	1.90
5	170	2.5	46.41	0.34	16.3	49.19	0.02	2.10	52.17	43.89	1.92
1	180	2.5	39.61	10.37	25.79	48.39	0.025	3.80	35.30	44.20	1.80
2	180	2.5	46.17	2.67	16.34	49.05	0.022	3.70	35.65	44.64	1.82

3	180	2.5	52.82	-0.85	16.11	55.23	0.024	3.80	35.69	44.69	1.82
4	180	2.5	52.78	-0.57	15.43	54.99	0.026	3.70	35.26	44.16	1.80
5	180	2.5	47.94	-1.18	15.28	50.33	0.022	3.80	35.62	44.60	1.82
1	190	2.5	39.92	9.06	22.77	46.84	0.026	3.50	24.60	43.20	1.90
2	190	2.5	49.4	4.74	24.12	55.18	0.022	3.40	24.85	43.63	1.92
3	190	2.5	46.99	-1.91	5.83	47.39	0.024	3.50	24.87	43.68	1.92
4	190	2.5	57.97	0.35	18.59	60.88	0.026	3.35	24.58	43.16	1.90
5	190	2.5	48.93	0.31	15.21	51.24	0.022	3.35	24.82	43.59	1.92
1	170	4	51.44	5.21	25.51	57.65	0.055	4.20	39.50	44.80	1.25
2	170	4	45.34	6.42	23.61	51.52	0.055	4.10	39.90	45.25	1.26
3	170	4	58.02	1.46	18.38	60.88	0.049	4.20	39.93	45.29	1.26
4	170	4	56.05	-0.99	15	58.03	0.058	4.10	39.46	44.76	1.25
5	170	4	51.16	1.21	16.86	53.88	0.051	4.80	39.86	45.20	1.26
1	180	4	41.84	10.52	27.37	51.09	0.062	5.40	21.80	45.10	1.15
2	180	4	49.56	4.95	21.85	54.39	0.063	5.40	22.02	45.55	1.16
3	180	4	55.96	0.39	20.96	59.76	0.063	5.50	22.04	45.60	1.16
4	180	4	58.74	0.48	18.19	61.49	0.064	5.10	21.78	45.05	1.15
5	180	4	46.48	1.04	18.94	50.20	0.0061	5.20	22.00	45.51	1.16
1	190	4	54.61	4.6	29.7	62.33	0.11	6.50	10.20	44.20	1.20
2	190	4	42.37	9.55	26.03	50.64	0.11	6.40	10.30	44.64	1.21
3	190	4	58.49	1.32	24.32	63.36	0.109	6.20	10.31	44.69	1.21
4	190	4	56.94	0.8	24.13	61.85	0.111	6.30	10.19	44.16	1.20
5	190	4	52.82	3.56	23.35	57.86	0.109	6.40	10.29	44.60	1.21

Variedad: (1) Amarilis, (2) Única, (3) Huevo de Indio, (4) Yungay y (5) Liberteña

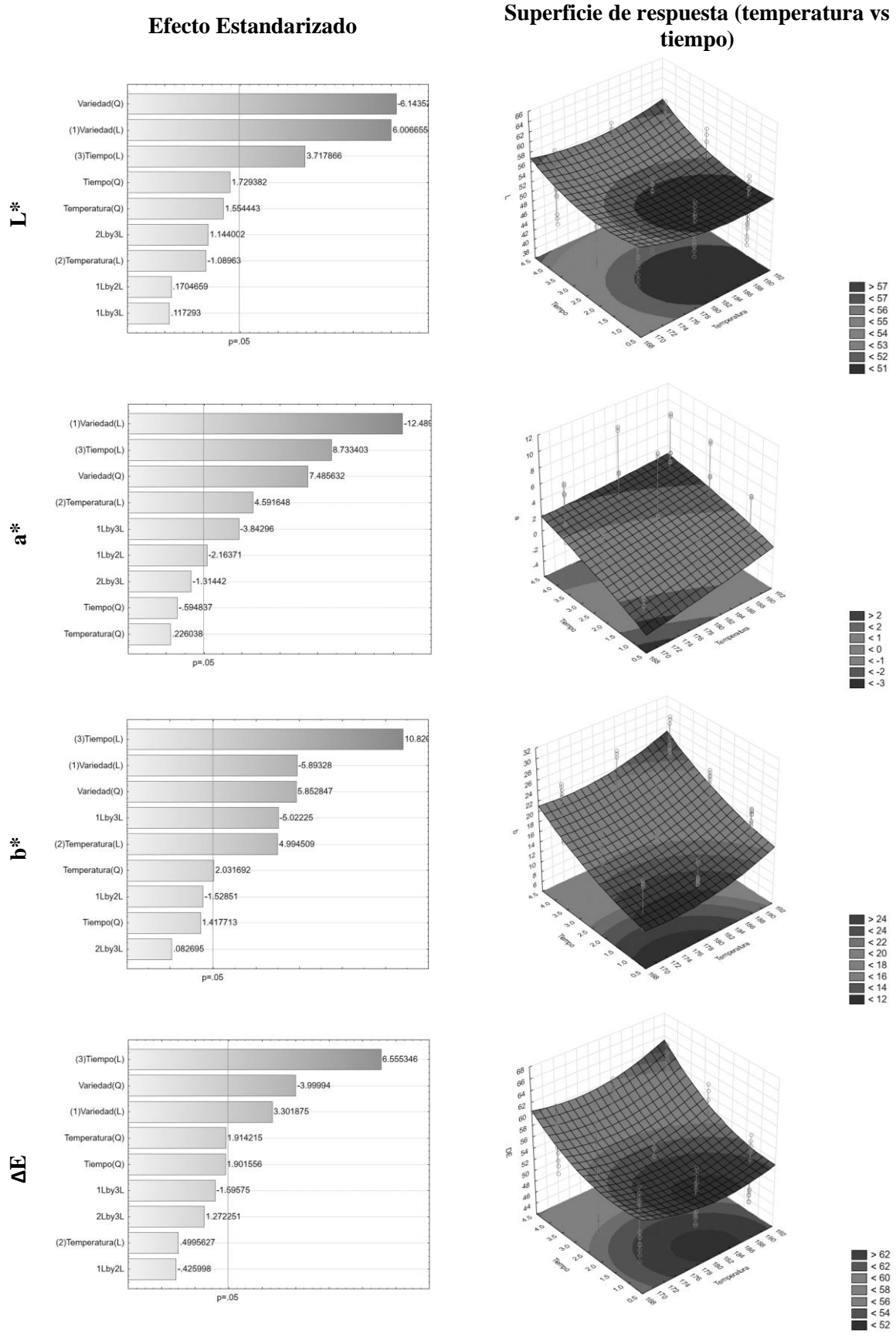


Figura 30. Gráfico de Pareto de efecto estandarizado y superficies de respuesta para parámetros fisicoquímicos

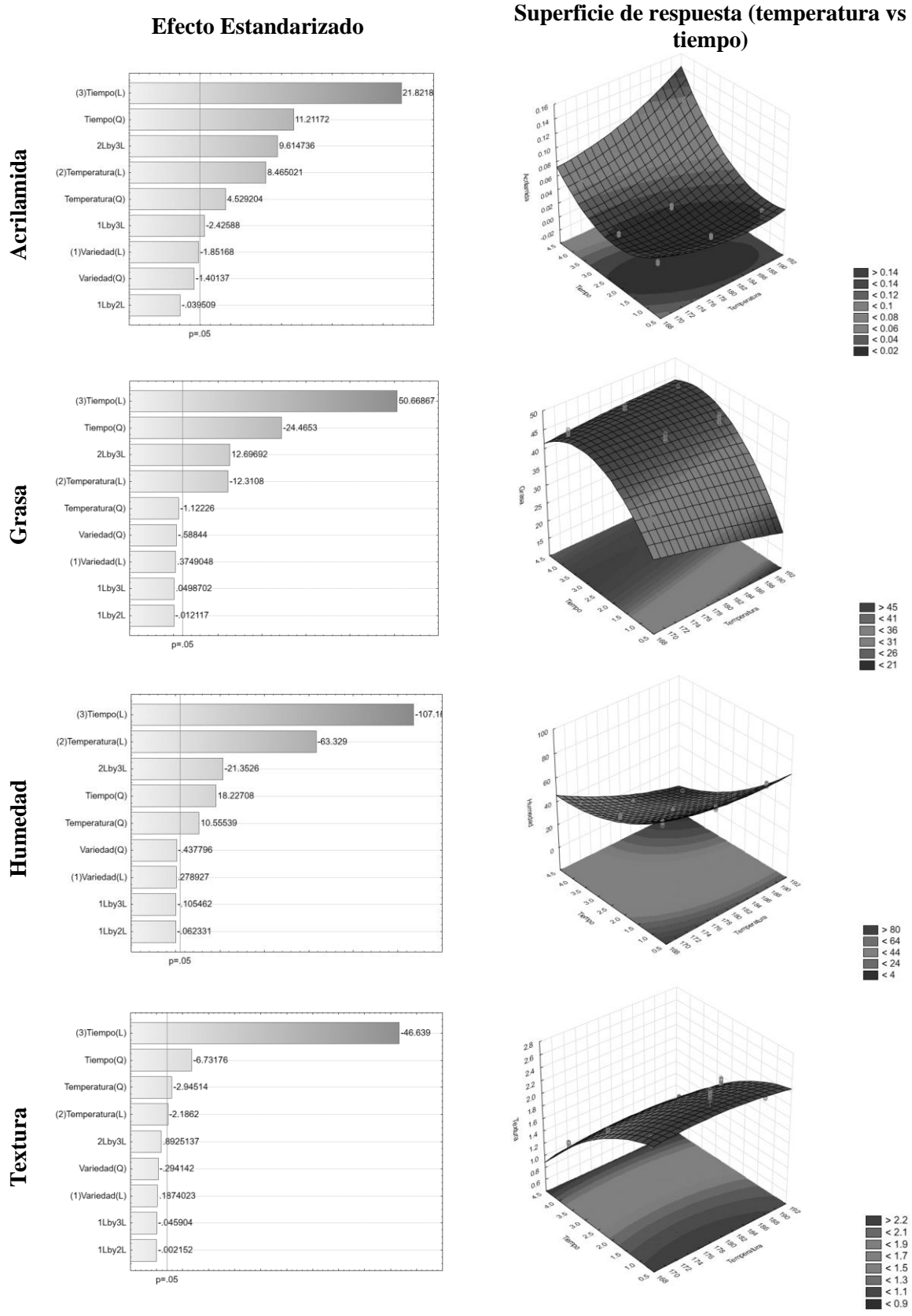


Figura 30. Gráfico de Pareto de efecto estandarizado y superficies de respuesta para parámetros fisicoquímicos (continuación)

Tabla 9. Valores de R² y coeficientes para los modelos de predicción fisicoquímica

Parámetro	Ecuación										R ²
	Parámetro = a*V + b*T + c*t + d*V ² + e*V*T + f *V*t + g*T ² + h*T*t + i *t ² + j										
	Donde: T: Temperatura t: Tiempo V: Variedad										
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	
L*	8.64218	-4.54231	-9.54281	-1.35249	0.00542	0.02496	0.01214	0.04213	0.60044	459.18500	0.7613
a*	0.56734	-0.04509	6.36204	0.70754	-0.02962	-0.35085	0.00076	-0.02077	-0.08874	-11.66050	0.869
b*	1.61919	-3.97336	2.56079	0.95656	-0.03620	-0.79282	0.01179	0.00226	0.36553	350.69000	0.825
ΔE	9.39979	-5.41572	-8.72154	-0.87712	-0.01353	-0.33782	0.01489	0.04671	0.65812	531.65700	0.783
Acrilamida	0.00607	-0.03772	-0.19728	-0.00074	0.00010	-0.00119	0.00010	0.00092	0.01042	3.54060	0.942
Grasa	0.26825	0.41219	-7.58453	-0.03688	-0.00015	0.00315	-0.00251	0.13383	-2.43101	24.81650	0.964
Humedad	0.41682	-12.03160	30.59450	-0.03775	-0.00078	-0.00870	0.03245	-0.30942	2.49012	1196.17000	0.986
Textura	0.01465	0.20436	-0.20222	-0.00153	-0.00002	-0.00007	-0.00058	0.00080	-0.05970	-15.57580	0.958

La textura evaluada tuvo como variable significativa solo al tiempo de fritura ($p < 0.05$) pero la temperatura también jugó un efecto importante, estos cambios en las propiedades fisicoquímicas por efecto de la temperatura, tiempo y variedad han sido reportados por múltiples investigaciones, siendo unos de las propiedades más medidas el de textura, estudios como el de (Pedreschi et al., 2001) informan que estos cambios se deben a la separación celular debido a la desestabilización de los materiales pécticos durante el procesamiento térmico, asimismo Martens & Thybo (2000) informaron valores más altos de fracturabilidad y dureza para los tubérculos de patata con arreglos de celdas compactas y mayor contenido de almidón.

Los resultados obtenidos se midieron en el núcleo, esto con el objetivo luego de relacionarlo a la microestructura, esto es importante ya que la estructura del núcleo y la corteza de un producto frito se ve afectada por la relación tiempo-temperatura y el proceso de fritura, dando como resultado diferentes tipos de productos fritos. Las transformaciones durante la fritura determinan las propiedades microestructurales de la corteza, como la porosidad, la forma del tamaño de los poros y la distribución de los poros (Ziaifar et al., 2010).

Los valores de composición de las cinco variedades de patata solo afectaron a las respuestas referidas al color, esto puede ser debido a que en el proceso de fritura con aceite genera un alto shock térmico en los almidones y de acuerdo a Dhital et al. (2018), la abundancia de almidón en las células de patata y la forma y tamaño de los gránulos de almidón también son importantes para el color y la textura final.

Conocer el comportamiento de la textura es de suma importancia ya que las patatas fritas son un producto mixto con núcleo húmedo y corteza seca y crujiente, esto debido a que la evaporación en la superficie del producto es rápida en comparación con la migración de humedad dentro del producto (Van Koerten et al., 2015b). Por lo tanto, una buena comprensión de la textura de la patata requiere un conocimiento suficiente de las características microestructurales, como la forma y el tamaño de las células y las características de la pared celular.

En los resultados de este trabajo el tiempo tuvo el más alto efecto significativo sobre la adsorción de aceite y humedad, comportamiento parecido al que se obtuvo sobre el comportamiento de los parámetros microestructurales de las patatas evaluadas en esta investigación, esto puede ser debido a que la microestructura de las patatas se relaciona a la porosidad de la corteza y ello a la cantidad de aceite que puede retener, esto es un parámetro de suma importancia sobre el tema Van Koerten et al. (2015a) manifiesta que la adsorción de aceite se ve obstaculizada por el flujo de vapor a contracorriente de los poros lo cual explica los diferentes tiempos de adsorción del aceite en el tejido de patata.

La comprensión integral del mecanismo de adsorción de aceite es básica y vital para controlar el contenido de aceite de las patatas fritas, por lo que es crucial encontrar relaciones que puedan explicar este fenómeno en base a una mirada de la microestructura de las patatas y sus características de proceso como tiempo y temperatura en la fritura. Los mecanismos de adsorción de aceite generalmente reconocidos incluyen la sustitución del agua, el efecto de condensación, el efecto capilar y el efecto tensioactivo (Liu et al.,

2021). La adsorción de aceite es un proceso complejo y se ve afectado por muchos factores, uno de ellos es los cambios microestructurales por efecto del tiempo y la temperatura de fritura.

Generalmente se tiene como principio que el contenido de aceite aumenta con el aumento del tiempo de fritura, pero tal como se mostró en los resultados el efecto de la temperatura de fritura en el contenido de aceite es diferente debido a la diferencia de propiedades como son las variedades, esto influyó en las propiedades de la estructura de las patatas, la microestructura y sus características celulares como la el aumento de área, elongación o compactación tiene una influencia importante en la adsorción de aceite.

Estudios previos encontraron que los atributos de la corteza de los alimentos fritos, principalmente la irregularidad o aspereza, influyeron mucho en la succión del aceite encontrando una buena concordancia entre la adsorción de aceite y la descripción de la superficie en las patatas fritas (Liu et al., 2021). Este fenómeno ha sido descrito ampliamente y estudios manifiestan que durante la fritura, el agua presente en la materia prima se evapora y es reemplazada parcialmente por aceite, constituyendo hasta el 40% del producto terminado y, en consecuencia, influyendo en sus propiedades de sabor, aroma y textura, dependiendo de la cantidad de aceite adsorbido durante la fritura (Dana & Saguy, 2006).

Un estudio en una muestra simulada de un modelo microscópico de vidrio con la misma distribución de tamaño de poro muestra una observación directa del fenómeno de transmisión de aceite donde se observó que el tamaño de poro, es el parámetro más importante ya que tiene un impacto significativo en las propiedades de transporte del aceite en el proceso de fritura (Cortés

et al., 2014). Pero estos modelos no representan la complejidad de un tejido real como el usado en la tesis con las patatas, por ello las distribuciones de los diferentes parámetros microestructurales pueden dar más información de cómo ingresa más o menos aceite y relacionarlo a estas características lo cual representa un aporte en la comprensión de este fenómeno, muchos estudios observan la fritura por inmersión en aceite desde un punto de vista externo, observarlo desde un punto de vista microscópico aporta un mayor entendimiento de lo que puede pasar en este proceso ya que se puede plantear la forma en que el aceite ingresa a la muestra y cómo se distribuye en el interior.

Respecto a estas relaciones microestructura y adsorción de aceite trabajos como el de Troncoso & Pedreschi (2009) determinaron que la mayor parte de la fracción de aceite es succionada por la microestructura de la patata durante el período de enfriamiento, lo que sugiere que la adsorción de aceite está estrictamente relacionada con la pérdida de humedad. Por ello, la evaluación de la humedad es un indicador que permite relacionarlo a la adsorción de aceite ya que esto se da por un fenómeno superficial y la mayor parte del aceite es adsorbido por el producto frito en el período posterior a la fritura.

Respecto a los parámetros de color L^* , a^* , b^* y ΔE se puede observar que la variedad resultó ser significativa ($p < 0.05$) junto con el tiempo, en este caso es importante relacionar este cambio a situaciones de pardeamiento por efecto de la fritura y de la generación de compuestos como acrilamida donde el tiempo fue más significativo que la Temperatura en su generación. Se plantea esta relación entre los parámetros de color y la acrilamida ya que la

reacción de Maillard es la vía principal para la formación de acrilamida en presencia de precursores, a saber, asparagina libre y azúcares reductores, además la vía de oxidación de los lípidos también contribuye a la formación de acrilamida en los productos fritos(Ehling & Shibamoto, 2005).

Un punto importante es que los valores de temperatura usados en esta investigación fueron superiores a 170° C lo cual según Grob et al. (2003) debería de favorecer la formación de acrilamidas, cosa que no se observó en los resultados, siendo más importante la variedad de patata usada.

5.5. Relación estructura-propiedad-proceso

Las relaciones complejas que existen entre una amplia gama de variables deben evaluarse una a una, sobre todo cuando se trata de predecir el comportamiento del proceso de fritura, por ello de ambos análisis realizados en la presente investigación, tanto de las características microestructurales, así como de las características fisicoquímicas de las patatas, se realizaron las correlaciones en base a valores de correlación de Pearson los cuales se observan en la Figura 31 donde esta las dispersiones de los datos evaluados y en la Figura 32 se muestra los coeficientes de Pearson agrupados en un mapa de calor.

La microestructura de la patata representada por parámetros como son compactación, elongación, redondez, longitud de eje mayor, longitud de eje menor, perímetro y áreas celulares que representan los cambios en el tamaño de las células del parénquima así como su naturaleza de la composición por cada variedad son factores importantes que pueden influir en los cambios

externos representados por las características fisicoquímicas y que son importantes para el diseño tecnológico de un producto como las patatas fritas.

El conjunto estructura-propiedad se refiere al conocimiento de la estructura y las propiedades de un sistema, así como a la comprensión de las relaciones existentes entre ambos conceptos y, por supuesto, la capacidad de predecir los cambios que se producen en las propiedades de los alimentos, cuando cualquier cambio en la estructura de los alimentos se produce (Aguilera et al., 2003).

El mapa de calor mostrado en la Figura 31 está codificado por colores con azul y rojo en diferentes intensidades. El azul indica una correlación negativa, el rojo denota una correlación positiva y las intensidades crecientes indican un aumento en el factor de correlación. Los coeficientes de correlación lineal (R) se consideran débiles ($R = 0,0 \sim 0,19$), moderados ($R = 0,2 \sim 0,6$) y fuertes ($R = 0,6 \sim 1,0$) (Liu et al., 2022). Diversos estudios han utilizado la correlación de Pearson para poder relacionar propiedades microestructurales con parámetros fisicoquímicos como en la relación de la gelatinización del almidón con textura (Zhao et al., 2022) o en productos hidrobiológicos (Wang et al., 2022).

Se observa que las correlaciones entre las variables fisicoquímicas evaluadas generan correlaciones de media a fuerte, de la misma forma sucede entre las variables del tipo microestructural. Pero al evaluar las correlaciones entre variables fisicoquímicas y microestructurales se encuentra que en la mayoría están en los valores bajos y medios, siendo la variable elongación la que menos correlación tiene con variables del tipo fisicoquímico y las variables de longitud de eje mayor, longitud de eje menor, perímetro y áreas

celulares los que tienen una mayor correlación lineal con las variables fisicoquímicas.

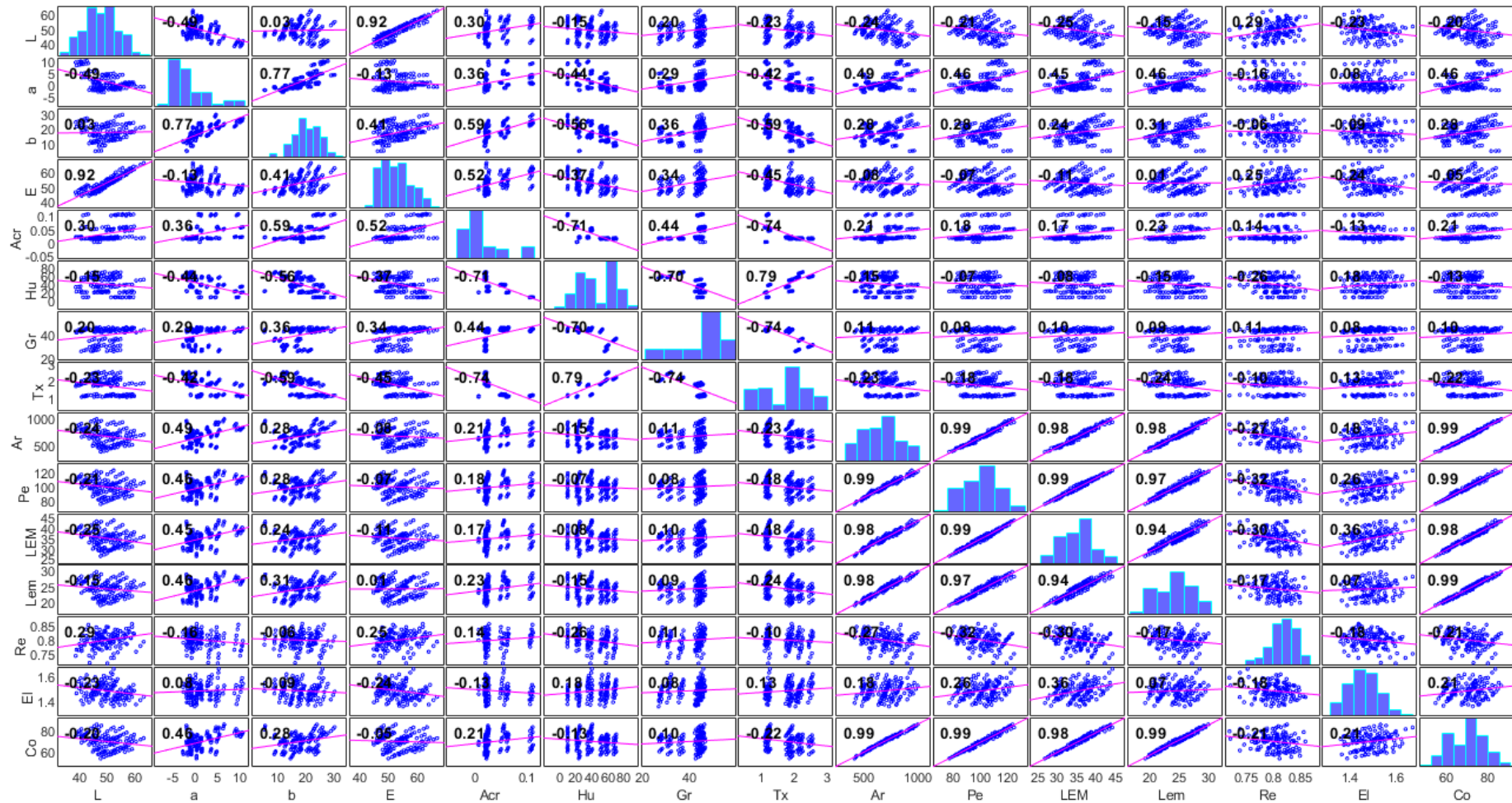


Figura 31. Correlación de parámetros microestructurales vs parámetros fisicoquímicos

	a	b	L	ΔE	Acrilamida	Grasa	Humedad	Textura	Area	Perímetro	L. eje mayor	L. eje menor	Redondez	Elongación	Compactación
a	1.00	0.77	-0.49	-0.13	0.37	0.29	-0.44	-0.42	0.49	0.46	0.45	0.46	-0.15	0.08	0.46
b	0.77	1.00	0.03	0.41	0.59	0.36	-0.56	-0.59	0.28	0.28	0.24	0.31	-0.05	-0.09	0.28
L	-0.49	0.03	1.00	0.92	0.30	0.20	-0.15	-0.23	-0.24	-0.21	-0.25	-0.15	0.28	-0.23	-0.20
ΔE	-0.13	0.41	0.92	1.00	0.51	0.34	-0.37	-0.45	-0.08	-0.07	-0.11	0.01	0.24	-0.24	-0.05
Acrilamida	0.37	0.59	0.30	0.51	1.00	0.43	-0.71	-0.74	0.22	0.18	0.17	0.24	0.14	-0.13	0.22
Grasa	0.29	0.36	0.20	0.34	0.43	1.00	-0.70	-0.74	0.11	0.08	0.10	0.09	0.11	0.09	0.10
Humedad	-0.44	-0.56	-0.15	-0.37	-0.71	-0.70	1.00	0.79	-0.15	-0.07	-0.08	-0.15	-0.25	0.17	-0.13
Textura	-0.42	-0.59	-0.23	-0.45	-0.74	-0.74	0.79	1.00	-0.23	-0.18	-0.18	-0.24	-0.10	0.12	-0.22
Area	0.49	0.28	-0.24	-0.08	0.22	0.11	-0.15	-0.23	1.00	0.99	0.98	0.98	-0.26	0.18	0.99
Perímetro	0.46	0.28	-0.21	-0.07	0.18	0.08	-0.07	-0.18	0.99	1.00	0.99	0.97	-0.31	0.25	0.99
L. eje mayor	0.45	0.24	-0.25	-0.11	0.17	0.10	-0.08	-0.18	0.98	0.99	1.00	0.94	-0.29	0.36	0.98
L. eje menor	0.46	0.31	-0.15	0.01	0.24	0.09	-0.15	-0.24	0.98	0.97	0.94	1.00	-0.15	0.07	0.99
Redondez	-0.15	-0.05	0.28	0.24	0.14	0.11	-0.25	-0.10	-0.26	-0.31	-0.29	-0.15	1.00	-0.19	-0.20
Elongación	0.08	-0.09	-0.23	-0.24	-0.13	0.09	0.17	0.12	0.18	0.25	0.36	0.07	-0.19	1.00	0.21
Compactación	0.46	0.28	-0.20	-0.05	0.22	0.10	-0.13	-0.22	0.99	0.99	0.98	0.99	-0.20	0.21	1.00

Figura 32. Factores de Pearson para la Correlación de parámetros microestructurales vs parámetros fisicoquímicos

5.6. Efecto de las variedades de patata, temperatura y tiempo de fritura sobre las características espectrales usando análisis Raman.

De la observación de la investigación se determinó que la presencia del aceite usado es importante al momento de evaluar los análisis de las propiedades fisicoquímicas y microestructurales y sobre todo si tuvo cambios en el proceso de fritura, para poder evaluar este punto se usó la metodología de espectroscopía Raman en base al estudio realizado por Mazurek et al. (2016).

Previo al análisis Raman de las cinco variedades de patatas, se analizó el aceite. Se observa en la Figura 33 que los espectros Raman de muestras de aceite tomadas antes y después de freír no presentan ningún cambio prominente. Este resultado también fue reportado por (Saleem et al., 2020), en el cual se señala que el aceite de canola (uno de los ingredientes del aceite que se utilizó en este trabajo) no sufre una variación significativa en su espectro Raman luego de ser sometida a diferentes temperaturas de calentamiento (desde 100°C hasta 200°C). En la Figura 34 se comparan los espectros Raman de las cinco variedades de patatas. Las variaciones espectrales pueden ser visualizadas en las posiciones de bandas de 478 y 2902 cm^{-1} . Evidentemente, las 5 variedades de patatas tienen en común las mismas bandas Raman con diferentes intensidades relativas, a diferencia de la variedad 5 que presenta una banda adicional en la posición 1654 cm^{-1} .

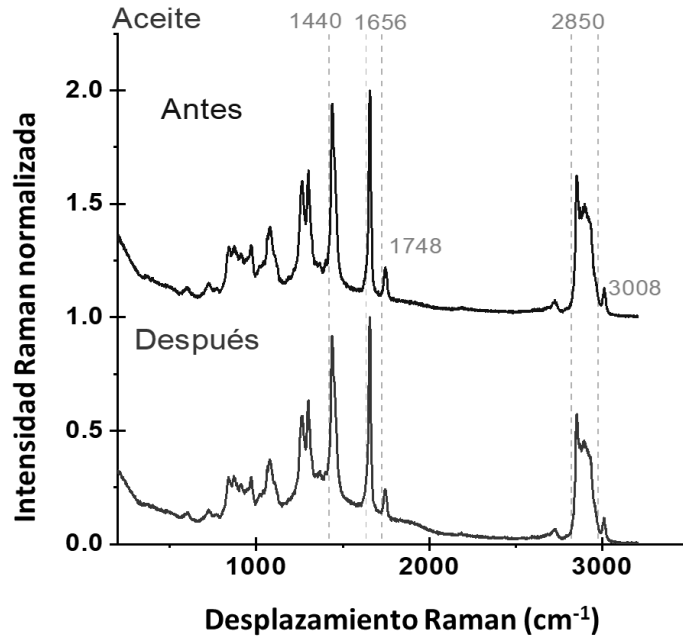


Figura 33. Perfil Raman de aceite

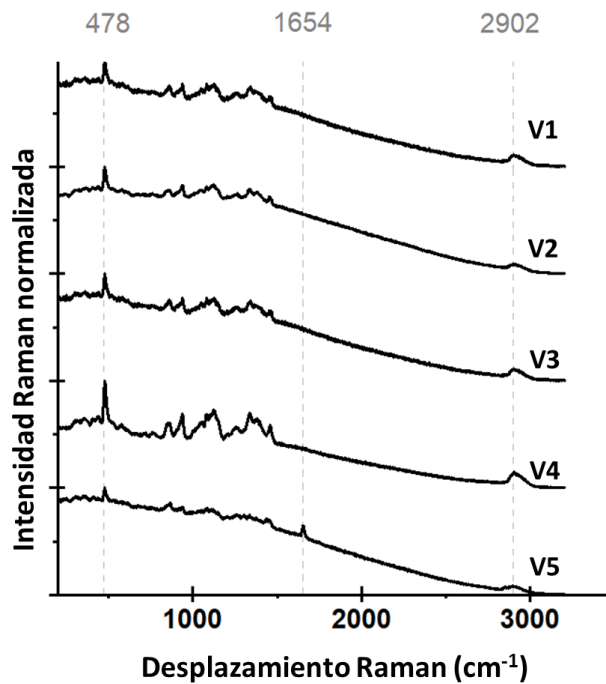


Figura 34. Espectros de corrimiento Raman de las 5 variedades de patatas no fritas (V1: V. Única; V2: V. Yungay; V3: V. Huevo de indio; V4: V. Liberteña; y V5: V. Amarilis)

En la Figura 35 se observa que los espectros Raman de las muestras pertenecientes a la variedad Única, sometidas a la temperatura de 170°C por 1 min, tanto del núcleo como de la corteza presentan bandas Raman pertenecientes al aceite. Por el contrario, en las muestras sometidas a las temperaturas de 180°C y 190°C por 1 min no se observan las bandas Raman del aceite. Adicionalmente, al aumentar el tiempo de 1 min a 2.5 min en las muestras sometidas a 180°C y 190°C, se observa que el núcleo adsorbe aceite. Luego, al aumentar el tiempo a 4 min solo se observa el espectro Raman de la variedad Única. Esto sugiere que el aceite presente en el núcleo se desplaza hacia la parte externa (corteza) para tiempos mayores a 2.5 min. Esto se puede corroborar al analizar la zona de corteza de dichas muestras sometidas a una temperatura de 180°C por 4 min donde se observa que hay bandas de aceite presentes en el espectro Raman. Por otro lado, el análisis de la zona de corteza de las muestras sometidas a la temperatura de 190°C para los tiempos de 1, 2.5 y 4 min no es posible identificar claramente bandas Raman definidas a excepción de la banda Raman en 478 cm^{-1} perteneciente al espectro característico de la patata. Esto indica que la corteza a esa temperatura empieza a degradarse por lo que la intensidad de la señal Raman es deficiente.

En el caso de la variedad de patata Yungay (ver Figura 36), no se observan bandas Raman representativas del aceite para todas las temperaturas y tiempos en la parte del núcleo. Esto sugiere que el aceite no es adsorbido considerablemente por esta variedad de patata. Por otro lado, en la zona de la corteza, para las muestras sometidas a las temperaturas de 170°C y 180°C por un tiempo de 1 min, se observa la banda Raman característica del aceite en

1656 cm^{-1} . Para esta misma variedad de patata Yungay, al aumentar el tiempo de fritura mayor a 1 min en todas las temperaturas, la zona de la corteza empieza a degradarse. En la Figura 37 se observa que los espectros Raman de las muestras pertenecientes a la variedad Huevo de Indio, sometidas a la temperatura de 170°C por 1 min, tanto el núcleo como la corteza presentan bandas Raman pertenecientes al aceite por lo que se afirma que el núcleo adsorbe aceite

En el caso de la variedad de patata Liberteña (ver Figura 38), a medida que se incrementa la temperatura y el tiempo de fritura las bandas de aceite se van superponiendo con el espectro Raman de la variedad de patata Liberteña. En consecuencia, la patata adsorbe aceite. De igual manera, en la zona de la corteza se evidencia la presencia de las bandas Raman características del aceite dentro del espectro Raman de la variedad Liberteña. Por lo tanto, las contribuciones del almidón y los ésteres de ácidos grasos que se originan en el aceite dominan los modos vibracionales de la patata frita. Finalmente, la variedad de patata Amarilis presenta una baja señal en la dispersión Raman, ya que se degrada de manera más rápida al aumentar el tiempo y temperatura de fritura tal como se muestra en la Figura 38.

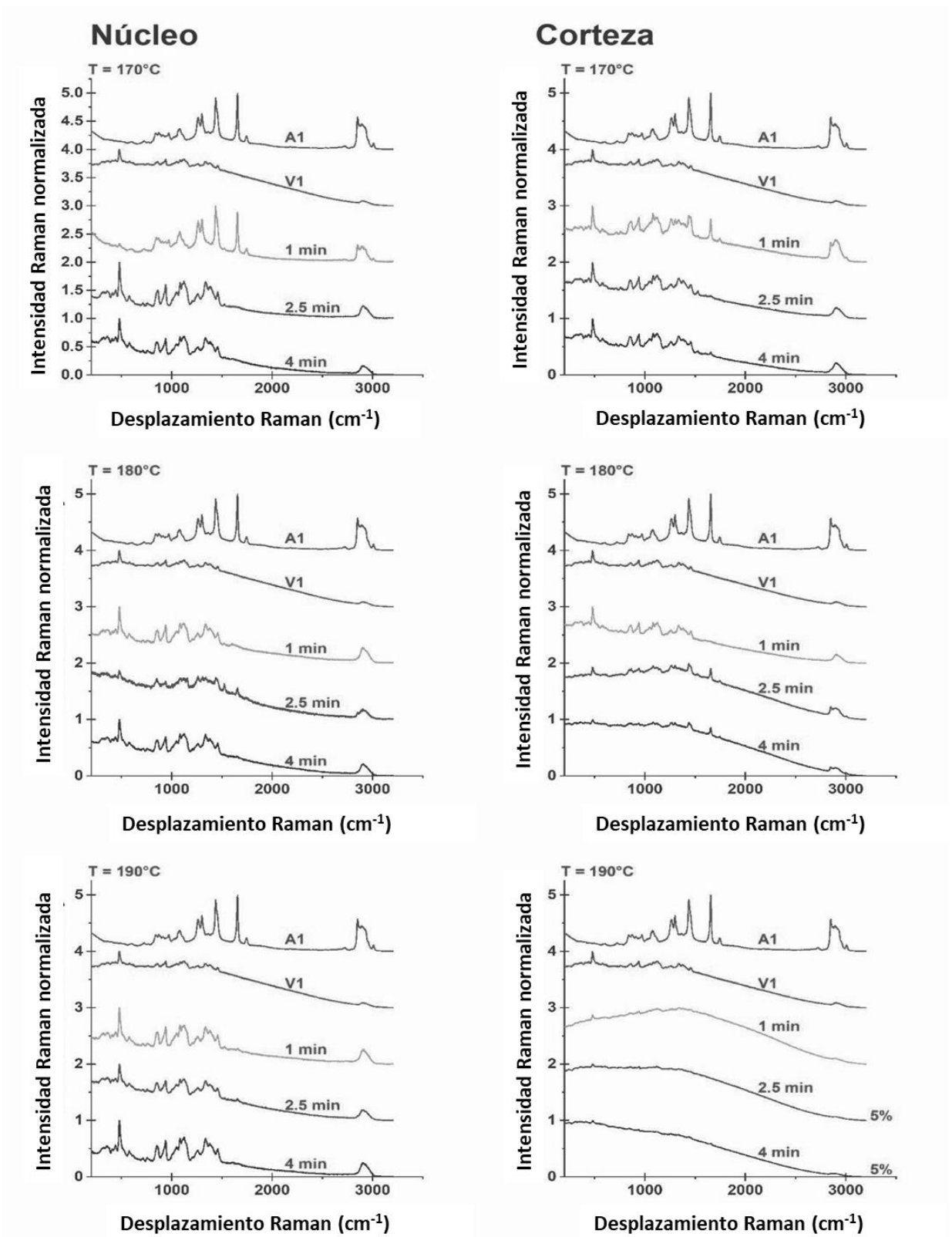


Figura 35. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata Única a diferentes temperaturas de fritura y tiempo. La columna izquierda y derecha de la imagen representan el núcleo y la corteza, respectivamente. A1 y V1 representan el espectro Raman del aceite y la variedad de patata sin freír

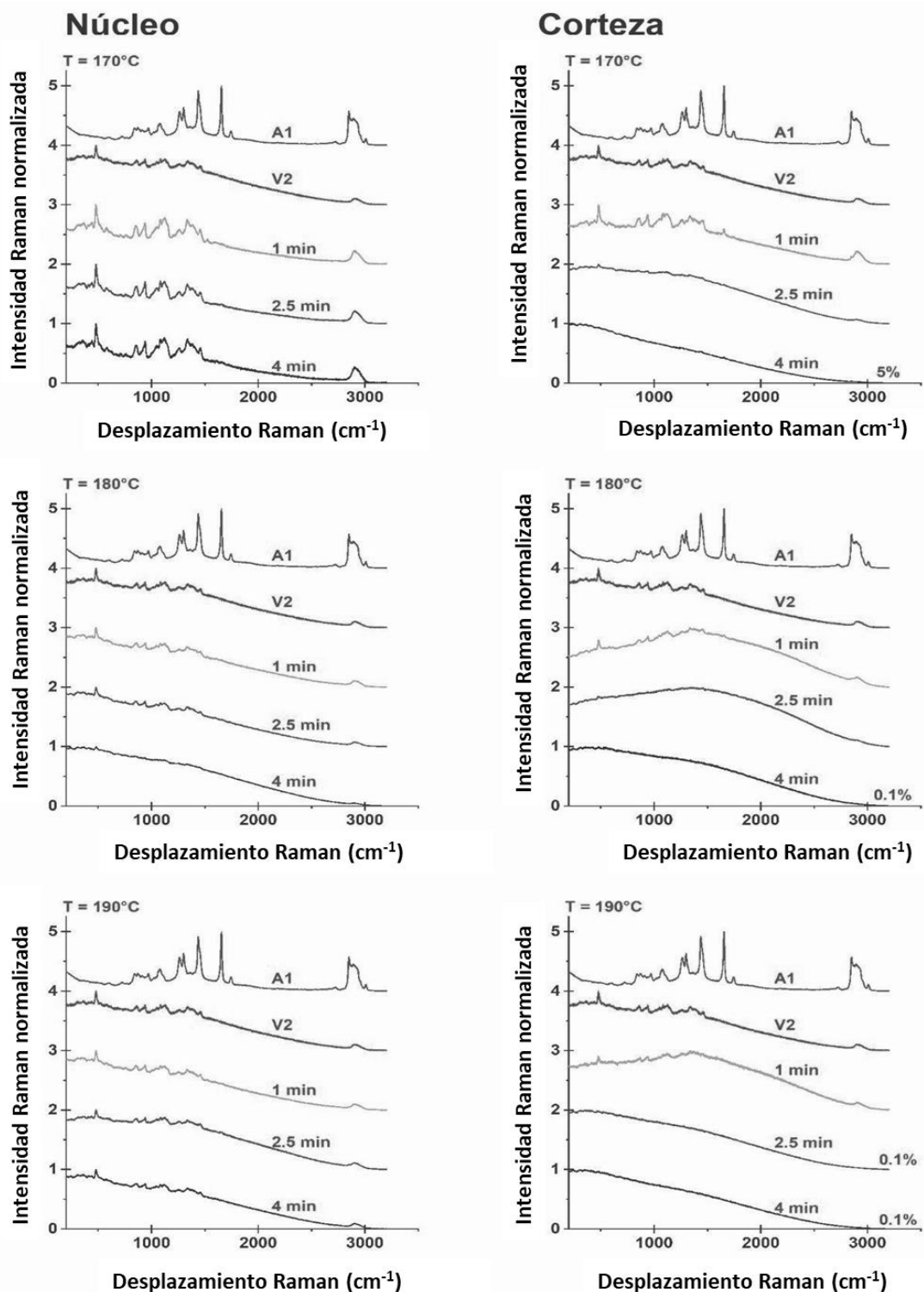


Figura 36. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata Yungay a diferentes temperaturas de fritura y tiempo. La columna izquierda y derecha de la imagen representan el núcleo y la corteza, respectivamente. A1 y V2 representan el espectro Raman del aceite y la variedad de patata sin freír

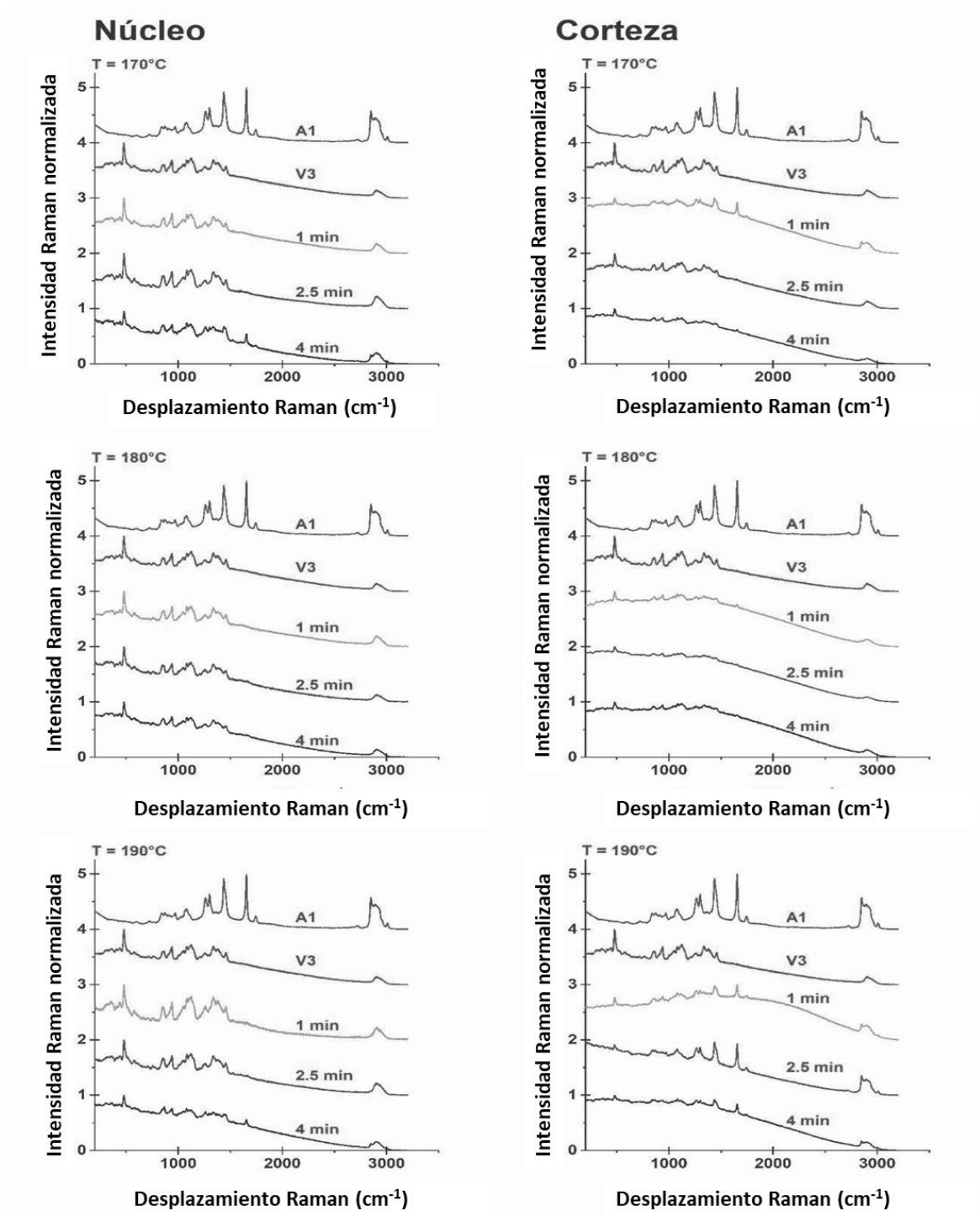


Figura 37. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata frita Huevo de Indio a diferentes temperaturas de fritura y tiempo. La columna izquierda y derecha de la imagen representan el núcleo y la corteza, respectivamente. A1 y V3 representan el espectro Raman del aceite y la variedad de patata sin freír

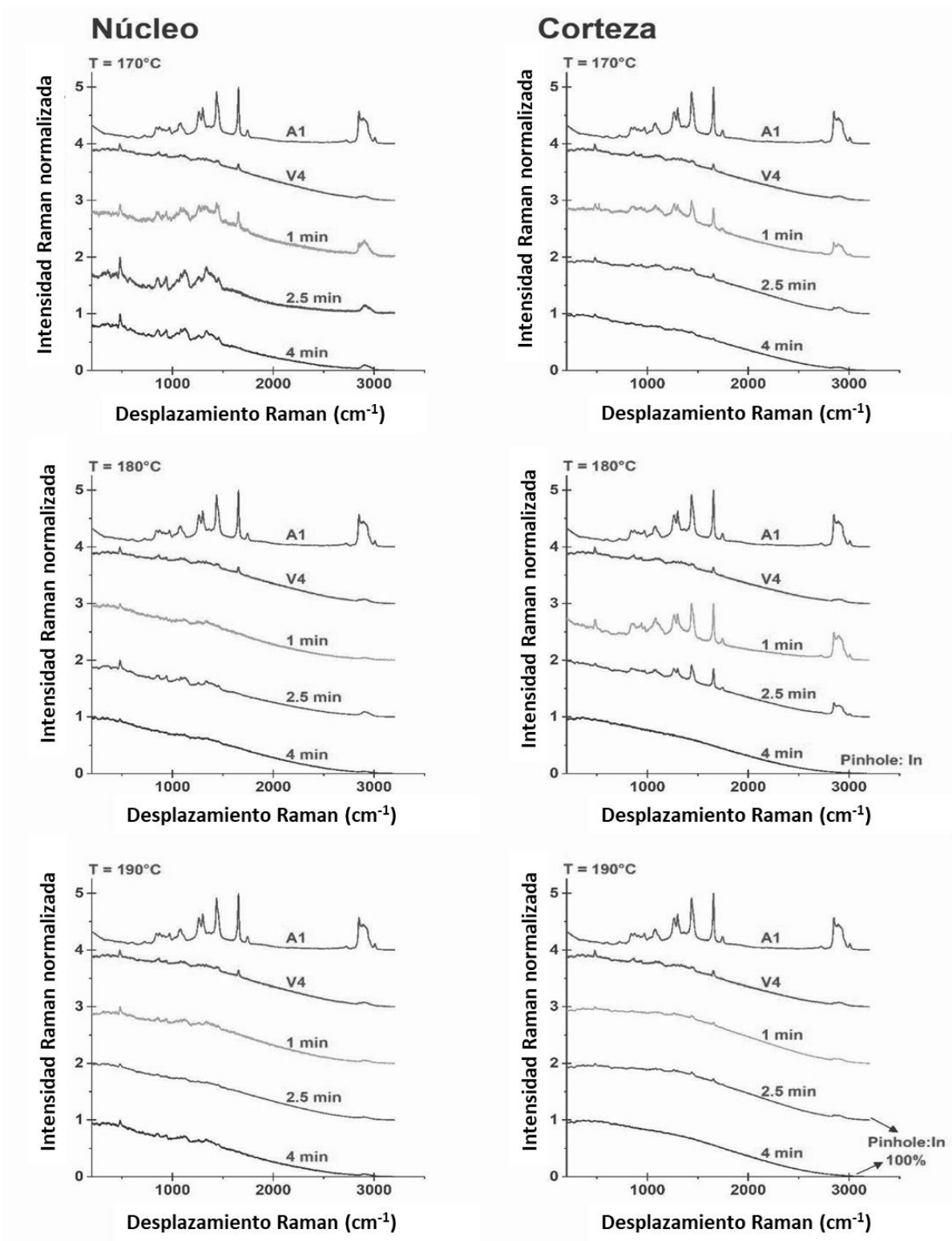


Figura 38. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata frita Libertena a diferentes temperaturas de fritura y tiempo. La columna izquierda y derecha de la imagen representan el núcleo y la corteza, respectivamente. A1 y V4 representan el espectro Raman del aceite y la variedad de patata sin freír.

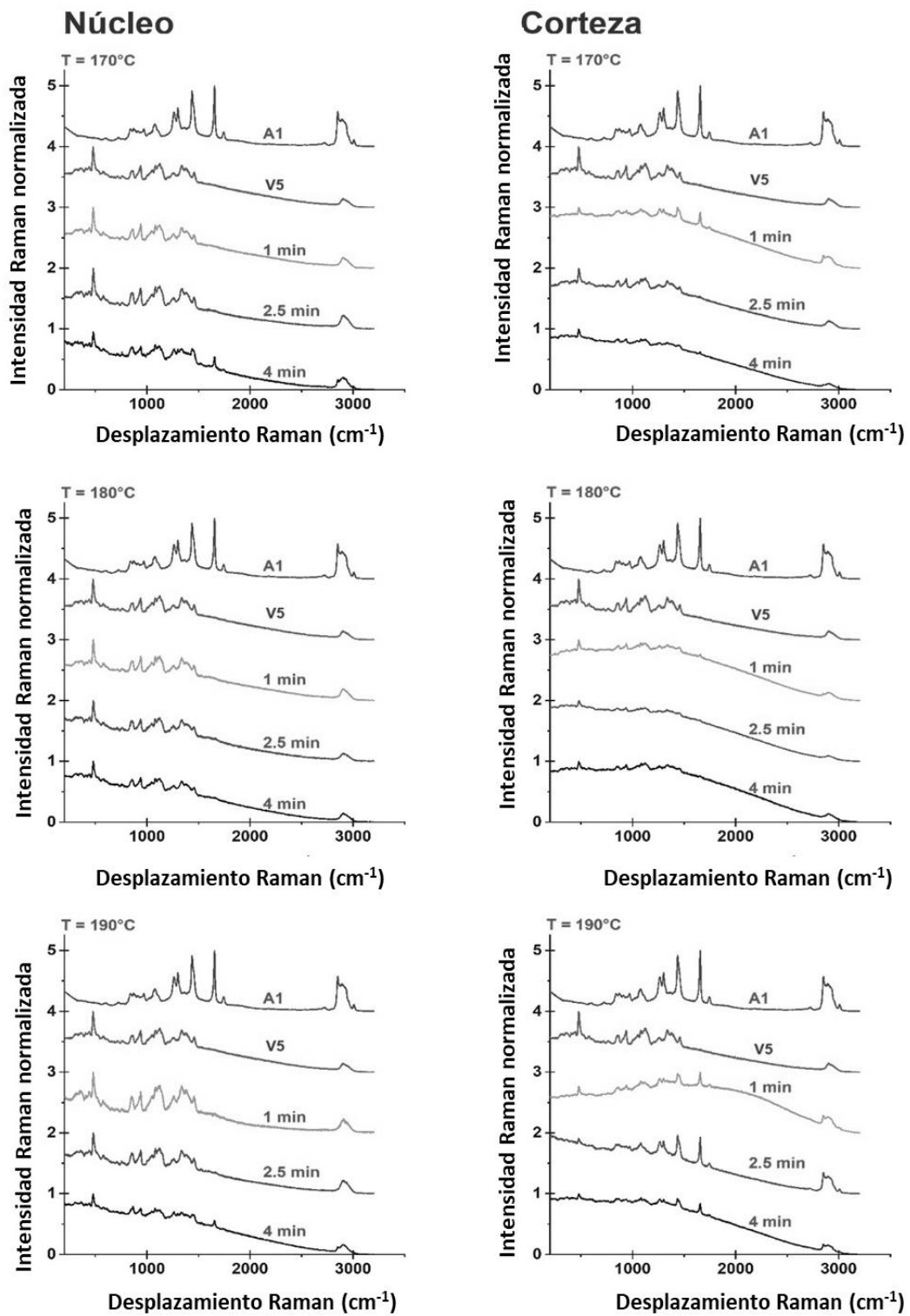


Figura 39. Espectros de corrimiento Raman de la variedad de patata Amarilis a diferentes temperaturas de fritura y tiempo. La columna izquierda y derecha de la imagen representan el núcleo y la corteza, respectivamente. A1 y V5 representan el espectro Raman

Al analizar las 5 variedades de patatas se puede observar el efecto de la temperatura y el tiempo de fritura sobre las regiones de corteza y núcleo de la patata frita en la morfología y los modos vibracionales de los compuestos presentes de la patata sin freír y frita. El contenido de aceite dentro del núcleo y la corteza de la patata frita depende de la variedad de la patata. Del análisis μ Raman se observa que la variedad de patata Única y Huevo de Indio adsorben aceite a una temperatura de 170°C y este se distribuye en toda la patata. Además, la degradación de esta variedad ocurre a 190°C en la superficie. Asimismo, las micrografías SEM de la corteza de esta variedad muestran que la degradación es visible a medida que se aumenta el tiempo de cocción debido a la pérdida de textura superficial. La variedad Yungay tiene la particularidad de degradarse en la superficie, mas no en el núcleo a medida que aumenta la temperatura y el tiempo. Las micrografías SEM del núcleo de esta variedad muestran una leve disminución de la textura superficial, mientras que las micrografías de la corteza se observa claramente una degradación en su superficie. La variedad de patata Libertena presenta la mejor dispersión Raman y la mayor tolerancia al aumento de temperatura y tiempo de fritura. Asimismo, las micrografías SEM en la parte de núcleo de esta variedad presentan una mayor tolerancia a la pérdida de la textura superficial, lo que sugiere una menor degradación. Por el contrario, la variedad Amarilis, de acuerdo con la alta luminiscencia y pobre señal de dispersión Raman observadas, se degrada de manera más rápida con el incremento de la temperatura y del tiempo.

Cuando los aceites comestibles se exponen a altas temperaturas, se producen varios cambios químicos y por ende en sus propiedades

fisicoquímicas y tal como se mostró en los resultados también en las microestructurales. Por ello, usar un método espectrofotométrico como RAMAN también puede generar un método para poder definir temas ligados a la calidad del proceso de fritura en patatas, este método ha sido estudiado y demostrado su eficiencia en variedades de aceite (Alvarenga et al., 2018; Castro et al., 2022). Del mismo este método espectroscópico puede dar información sobre condiciones de generación de compuestos importantes como acrilamida presente en frituras (Cheng et al., 2019), con lo cual se muestra que se puede aplicar técnicas no destructivas a condiciones de proceso en fritura.

Capítulo 6.

Conclusiones

Conclusiones

A partir de los resultados expuestos y discutidos en el capítulo anterior, las conclusiones que se pueden extraer son las siguientes:

- En este trabajo se diseñó un software que propuso el uso de técnicas de aprendizaje automático usando una red neuronal convolucional (RNC) para discriminar elementos microestructurales en tejidos vegetales. Las microestructuras del tejido de patata fueron clasificados con este software. Los resultados muestran que la RNC produce una discriminación relativamente buena en comparación con otros estudios, con una puntuación de 87.0%; el valor obtenido para cada uno de los valores estadísticos evaluados es: EXC = 0.858 ± 0.012 , SEN = 0.829 ± 0.022 , PRE = 0.924 ± 0.032 y MEF = 0.873 ± 0.011 .
- Se analizó el tejido de patatas de 5 variedades, de las cuales 4 son comerciales para proceso de fritura (Variedad Única, Variedad Libertena, Variedad Yungay y Variedad Amarilis) y 1 variedad de patata nativa (Variedad Huevo de Indio), la microestructura se estudió mediante observación microscópica y análisis de imágenes usándose los parámetros de compactación, elongación, redondez, Longitud de eje mayor, Longitud de eje menor, perímetro y áreas. Al comparar los siete parámetros microestructurales se determinó que se presenta diferencias significativas para cada variedad ($p < 0.05$), con alguna excepciones las cuales son, para Área celular (Amarilis – Única, Única - Yungay y Huevo de Indio –

Liberteña), perímetro celular (única – Yungay, Huevo de Indio – Liberteña y Yungay – Liberteña), Longitud del eje mayor (Amarilis – Única, Única – Yungay y Huevo de Indio – Liberteña), Longitud del eje menor (Amarilis – Única, Amarilis - Huevo de Indio, Amarilis – Liberteña, Única - Huevo de Indio, Única – Liberteña y Huevo de Indio – Liberteña), elongación celular (Amarilis – Única, Única – Yungay, Huevo de Indio – Yungay, Huevo de Indio – Liberteña y Yungay – Liberteña), redondez celular (Amarilis – Única, Única – Yungay y Huevo de Indio – Liberteña) y compactación celular a diferencia del resto de parámetros en los valores de elongación la variedad Amarilis es la única diferente significativamente del resto de variedades.

- El efecto de la temperatura, tiempo y variedad sobre características microestructuras y fisicoquímicas de las patatas fueron evaluadas usando ecuaciones cuadráticas usando un arreglo de superficie de respuesta, determinándose que la variedad de patata es el que ejerce un mayor efecto significativo en los parámetros microestructurales de Área, Perímetro, L. eje mayor, L. eje menor, Redondez, y Compactación ($p < 0.05$). El tiempo es la segunda variable con mayor efecto, siendo significativo ($p < 0.05$) para los parámetros microestructurales de Área, Perímetro, L. eje mayor, L. eje menor y Compactación. Finalmente, la temperatura solo ejerce un efecto significativo ($p < 0.05$) en los parámetros de Redondez y Elongación. En el análisis de las variables fisicoquímicas la textura evaluada tuvo como variable significativa solo al tiempo de fritura ($p < 0.05$) pero la temperatura también jugó un efecto importante, respecto a los parámetros de color L^* , a^* , b^* y ΔE se puede observar que la variedad resultó ser significativa

($p < 0.05$) junto con el tiempo, en este caso es importante relacionar este cambio a situaciones de pardeamiento por efecto de la fritura y de la generación de compuestos como acrilamida donde el tiempo fue más significativo que la Temperatura en su generación al igual que en los parámetros evaluados de grasa y humedad en las patatas fritas.

- Para evaluar la correlación entre las variables microestructurales y fisicoquímicas se determinó los coeficientes de Pearson donde se observa que las correlaciones entre las variables fisicoquímicas evaluadas generan correlaciones de media a fuerte, de la misma forma sucede entre las variables del tipo microestructural. Pero al evaluar las correlaciones entre variables fisicoquímicas y microestructurales se encontró que en la mayoría están en los valores bajos y medios, siendo la variable elongación la que menos correlación tiene con variables del tipo fisicoquímico y las variables de Longitud de eje mayor, Longitud de eje menor, perímetro y áreas celulares los que tienen una mayor correlación lineal con las variables fisicoquímicas.
- Al analizar las 5 variedades de patatas con espectroscopía RAMAN se pudo observar que el contenido de aceite dentro del núcleo y la corteza de la patata frita depende de la variedad de la patata. Del análisis Raman se observa que la variedad de patata Única y Huevo de Indio adsorben aceite a una temperatura de 170°C y este se distribuye en toda la patata. Además, la degradación de esta variedad ocurre a 190°C en la superficie. Asimismo, las micrografías SEM de la corteza de esta variedad muestran que la degradación es visible a medida que se aumenta el tiempo de cocción debido a la pérdida de textura superficial. La variedad Yungay tiene la

particularidad de degradarse en la superficie, mas no en el núcleo a medida que aumenta la temperatura y el tiempo. Las micrografías SEM del núcleo de esta variedad muestran una leve disminución de la textura superficial, mientras que las micrografías de la corteza se observa claramente una degradación en su superficie. La variedad de patata Liberteña presenta la mejor dispersión Raman y la mayor tolerancia al aumento de temperatura y tiempo de fritura. Asimismo, las micrografías SEM en la parte de núcleo de esta variedad presentan una mayor tolerancia a la pérdida de la textura superficial, lo que sugiere una menor degradación. Por el contrario, la variedad Amarilis, de acuerdo con la alta luminiscencia y pobre señal de dispersión Raman observadas, se degrada de manera más rápida con el incremento de la temperatura y del tiempo.

Referencias

- Aguilera, J. M. (2006). Food product engineering: Building the right structures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 1147-1155.
- Aguilera, J. M. (2005). Why food microstructure? *Journal of Food Engineering*, 67(1), 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050>
- Aguilera, J. M., Chiralt, A., & Fito, P. (2003). Food dehydration and product structure. *Trends in Food Science and Technology*, 14(10), 432-437. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(03)00122-5)
- Aguilera, J. M., & Gloria-Hernandez, H. (2000). Oil Absorption During Frying of Frozen Parfried Potatoes. *Journal of Food Science*, 65(3), 476-479. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16031.x>
- Aguilera, J. M., & Stanley, D. (1999). Microstructural principles of food processing and engineering (2.a ed.). Springer.
- Allende, A., Desmet, M., Vanstreels, E., Verlinden, B. E., & Nicolai, B. M. (2004). Micromechanical and geometrical properties of tomato skin related to differences in puncture injury susceptibility. *Postharvest Biology and Technology*, 34(2), 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.05.007>
- Alvani, K., Qi, X., Tester, R. F., & Snape, C. E. (2011). Physico-chemical properties of potato starches. *Food Chemistry*, 125(3), 958-965. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.088>
- Alvarenga, B. R., Xavier, F. A. N., Soares, F. L. F., & Carneiro, R. L. (2018). Thermal Stability Assessment of Vegetable Oils by Raman

Spectroscopy and Chemometrics. *Food Analytical Methods*, 11(7), 1969-1976. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1160-y>

- Alvis, A., Vélez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M., & Villada, H. S. (2009). Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Food Control*, 20(4), 321-325. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.05.016>
- Arroyo-Cerezo, A., Jimenez-Carvelo, A. M., González-Casado, A., Koidis, A., & Cuadros-Rodríguez, L. (2021). Deep (offset) non-invasive Raman spectroscopy for the evaluation of food and beverages – A review. *LWT-Food Science and Technology*, 149, 111822. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111822>
- Asokapandian, S., Swamy, G. J., & Hajjul, H. (2020). Deep fat frying of foods: A critical review on process and product parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(20), 3400-3413. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1688761>
- Baker, N., Lu, H., Erlikhman, G., & Kellman, P. J. (2018). Deep convolutional networks do not classify based on global object shape. *PLOS Computational Biology*, 14(12), e1006613. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006613>
- Başaran, B., & Turk, H. (2021). The influence of consecutive use of different oil types and frying oil in French fries on the acrylamide level. *Journal of Food Composition and Analysis*, 104, 104177. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104177>
- Biswas, S., & Barma, S. (2020). A large-scale optical microscopy image dataset of potato tuber for deep learning based plant cell assessment. *Scientific Data*, 7(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00706-9>

- Bordoloi, A., Kaur, L., & Singh, J. (2012). Parenchyma cell microstructure and textural characteristics of raw and cooked potatoes. *Food Chemistry*, 133(4), 1092-1100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.044>
- Bouchon, P. (2009). Chapter 5 Understanding Oil Absorption During Deep-Fat Frying. *En Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 57, pp. 209-234). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(09\)57005-2](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(09)57005-2)
- Bouchon, P., & Aguilera, J. M. (2001). Microstructural analysis of frying potatoes. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(6), 669-676. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00499.x>
- Bumbrah, G. S., & Sharma, R. M. (2016). Raman spectroscopy – Basic principle, instrumentation and selected applications for the characterization of drugs of abuse. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 6(3), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.ejfs.2015.06.001>
- Castro, R. C., Ribeiro, D. S. M., Santos, J. L. M., & Páscoa, R. N. M. J. (2022). The use of in-situ Raman spectroscopy to monitor at real time the quality of different types of edible oils under frying conditions. *Food Control*, 136, 108879. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108879>
- Castro, W., Mayor, L., Seguí, L., Fito, P., & Castro, E. (2011, octubre 23). Aplicación de redes neuronales a la clasificación de elementos estructurales en micrografías de tejido vegetal. *VIII Congreso iberoamericano de Ingeniería de Alimentos (CIBIA)*.
- Castro, W., Oblitas, J., De-La-Torre, M., Cotrina, C., Bazan, K., & Avila-George, H. (2019). Classification of Cape Gooseberry Fruit According to its Level of Ripeness Using Machine Learning Techniques and Different

Color Spaces. *IEEE Access*, 7, 27389-27400. Scopus.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2898223>

- Castro, W., Yoshida, H., Gil, L. S., López, L. M., Oblitas, J., De-la-Torre, M., & Avila-George, H. (2019). Microstructural analysis in foods of vegetal origin: An approach with convolutional neural networks. 2019 8th International Conference On Software Process Improvement (CIMPS), 1-5. <https://doi.org/10.1109/CIMPS49236.2019.9082421>
- Chen, J., & Rosenthal, A. (2015). 1—Food texture and structure. En J. Chen & A. Rosenthal (Eds.), *Modifying Food Texture* (pp. 3-24). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-333-1.00001-2>
- Cheng, J., Zhang, S., Wang, S., Wang, P., Su, X.-O., & Xie, J. (2019). Rapid and sensitive detection of acrylamide in fried food using dispersive solid-phase extraction combined with surface-enhanced Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 276, 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.004>
- Cortés, P., Badillo, G., Segura, L., & Bouchon, P. (2014). Experimental evidence of water loss and oil uptake during simulated deep-fat frying using glass micromodels. *Journal of Food Engineering*, 140, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.04.005>
- Crafts, A. S. (1944). Cellular, changes in certain fruits and vegetables during blanching and dehydration. *Food Research*, 9, 442-152.
- Dana, D., & Saguy, I. S. (2006). Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. *Advances in*

Colloid and Interface Science, 128-130, 267-272.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.11.013>

- de Assumpção Pereira-da-Silva, M., & Ferri, F. A. (2017). 1—Scanning Electron Microscopy. En A. L. Da Róz, M. Ferreira, F. de Lima Leite, & O. N. Oliveira (Eds.), *Nanocharacterization Techniques* (pp. 1-35). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00001-1>
- De Haan, S., & Rodriguez, F. (2016). Chapter 1—Potato Origin and Production. En J. Singh & L. Kaur (Eds.), *Advances in Potato Chemistry and Technology* (Second Edition) (pp. 1-32). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800002-1.00001-7>
- Derossi, A., Nicolai, B., Verboven, P., & Severini, C. (2017). Characterizing apple microstructure via directional statistical correlation functions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.021>
- Devi, S., Zhang, M., Ju, R., & Bhandari, B. (2020). Recent development of innovative methods for efficient frying technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 0(0), 1-16. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1804319>
- Dhital, S., Baier, S. K., Gidley, M. J., & Stokes, J. R. (2018). Microstructural properties of potato chips. *Food Structure*, 16, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.03.001>
- Du, C., & Sun, D.-W. (2006). Automatic measurement of pores and porosity in pork ham and their correlations with processing time, water content and texture. *Meat Science*, 72(2), 294-302.

- Du, C.-J., & Sun, D.-W. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: A review. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 39-55. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.11.017>
- Ehling, S., & Shibamoto, T. (2005). Correlation of Acrylamide Generation in Thermally Processed Model Systems of Asparagine and Glucose with Color Formation, Amounts of Pyrazines Formed, and Antioxidative Properties of Extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(12), 4813-4819. <https://doi.org/10.1021/jf0502606>
- Fellows, P. J. (2017). 18—Frying. En P. J. Fellows (Ed.), *Food Processing Technology (Fourth Edition)* (pp. 783-810). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100522-4.00018-3>
- Fennema, O., Damodaran, S., & Parkin, K. (2008). *Food chemistry* (4.a ed.). CRC Press.
- Fito, P., LeMaguer, M., Betoret, N., & Fito, P. J. (2007). Advanced food process engineering to model real foods and processes: The “SAFES” methodology. *Journal of Food Engineering*, 83, 173-185.
- Gamble, M. H., Rice, P., & Selman, J. D. (1987). Distribution and Morphology of Oil Deposits in Some Deep Fried Products. *Journal of Food Science*, 52(6), 1742-1743. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb05922.x>
- Garayo, J., & Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 181-191. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00062-6)

- Grados, D., García, S., & Schrevens, E. (2020). Assessing the potato yield gap in the Peruvian Central Andes. *Agricultural Systems*, 181, 102817. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102817>
- Grob, K., Biedermann, M., Biedermann-Brem, S., Noti, A., Imhof, D., Amrein, T., Pfefferle, A., & Bazzocco, D. (2003). French fries with less than 100 µg/kg acrylamide. A collaboration between cooks and analysts. *European Food Research and Technology*, 217(3), 185-194. <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0753-9>
- Guedes, J. S., Santos, K. C., Castanha, N., Rojas, M. L., Matta Junior, M. D., Lima, D. C., & Augusto, P. E. D. (2021). Structural modification on potato tissue and starch using ethanol pre-treatment and drying process. *Food Structure*, 29, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100202>
- He, F., Parvez Mahmud, M. A., Kouzani, A. Z., Anwar, A., Jiang, F., & Ling, S. H. (2022). An Improved SLIC Algorithm for Segmentation of Microscopic Cell Images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 73, 103464. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103464>
- Kassama, L. S., & Ngadi, M. O. (2004). Pore development in chicken meat during deep-fat frying. *LWT - Food Science and Technology*, 37(8), 841-847. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.03.010>
- Kita, A., Bąkowska-Barczak, A., Lisińska, G., Hamouz, K., & Kułakowska, K. (2015). Antioxidant activity and quality of red and purple flesh potato chips. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1, Part 2), 525-531. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.026>
- Kita, A., & Lisińska, G. (2005). The influence of oil type and frying temperatures on the texture and oil content of French fries. *Journal of the*

Science of Food and Agriculture, 85(15), 2600-2604.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.2319>

- Kraus, O. Z., Ba, J. L., & Frey, B. J. (2016). Classifying and segmenting microscopy images with deep multiple instance learning. *Bioinformatics*, 32(12), i52-i59. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw252>
- Lalam, S., Sandhu, J. S., Takhar, P. S., Thompson, L. D., & Alvarado, C. (2013). Experimental study on transport mechanisms during deep fat frying of chicken nuggets. *LWT - Food Science and Technology*, 50(1), 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.06.014>
- León, K., Mery, D., Pedreschi, F., & León, J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 39(10), 1084-1091. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.006>
- Lewicki, P. P., & Porzecka-Pawlak, R. (2005). Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.032>
- Lewins, J. D. (2004). Design of experiments for engineers and scientist: By Jiju Anthony, Butterworth-Heinemann 2003, ISBN0 7506 4709 4. *Tribology International*, 37(9), 771-772. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.04.002>
- Liu, Q., Tarn, R., Lynch, D., & Skjodt, N. M. (2007). Physicochemical properties of dry matter and starch from potatoes grown in Canada. *Food Chemistry*, 105(3), 897-907. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.034>
- Liu, Y., Sun, Q., Wei, S., Xia, Q., Pan, Y., Ji, H., Deng, C., Hao, J., & Liu, S. (2022). Insight into the correlations among rheological behaviour,

protein molecular structure and 3D printability during the processing of surimi from golden pompano (*Trachinotus ovatus*). *Food Chemistry*, 371, 131046. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131046>

- Liu, Y., Tian, J., Zhang, T., & Fan, L. (2021). Effects of frying temperature and pore profile on the oil absorption behavior of fried potato chips. *Food Chemistry*, 345, 128832. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128832>
- Lüttringhaus, S., Pradel, W., Suarez, V., Manrique-Carpintero, N. C., Anglin, N. L., Ellis, D., Hareau, G., Jamora, N., Smale, M., & Gómez, R. (2021). Dynamic guardianship of potato landraces by Andean communities and the genebank of the International Potato Center. <https://doi.org/10.18452/24543>
- Martens, H. J., & Thybo, A. K. (2000). An Integrated Microstructural, Sensory and Instrumental Approach to Describe Potato Texture. *LWT - Food Science and Technology*, 33(7), 471-482. <https://doi.org/10.1006/fstl.2000.0688>
- Martinez, N., Andrés, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). *Termodinámica y Cinética de Sistemas Alimento -Entorno*. Editorial UPV.
- Mayor, L., Moreira, R., & Sereno, A. M. (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 103(1), 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.08.031>
- Mayor, L., Pissarra, J., & Sereno, A. (2008). Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue. *Journal of Food Engineering*, 85, 326-339.

- Mazurek, S., Szostak, R., & Kita, A. (2016). Application of infrared reflection and Raman spectroscopy for quantitative determination of fat in potato chips. *Journal of Molecular Structure*, 1126, 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.01.064>
- Mebatsion, H., Verboven, P., Ho, Q., Verlinden, B., & Nicolai, B. (2008). Modeling fruit (micro) structures, why and how? *Trends in Food Science & Technology*, 19, 59-66.
- Mebatsion, H., Verboven, P., Melese, A., Billen, J., Ho, Q., & Nicolai, B. (2009). A novel method for 3-D microstructure modeling of pome fruit tissue using synchrotron radiation tomography images. *Journal of Food Engineering*, 93, 141-148.
- Miranda, M. L., & Aguilera, J. M. (2006). Structure and Texture Properties of Fried Potato Products. *Food Reviews International*, 22(2), 173-201. <https://doi.org/10.1080/87559120600574584>
- Oblitas, J., Mejia, J., De-la-Torre, M., Avila-George, H., Seguí Gil, L., Mayor López, L., Ibarz, A., & Castro, W. (2021). Classification of the Microstructural Elements of the Vegetal Tissue of the Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) Using Convolutional Neural Networks. *Applied Sciences*, 11(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/app11041581>
- Oblitas-Cruz, J. F., Castro-Silupu, W. M., & López, L. M. (2016). Effect of different combinations of size and shape parameters in the percentage error of classification of structural elements in vegetal tissue of the pumpkin *Cucurbita pepo* L. using probabilistic neural networks. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 78, Art. 78. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n78a04>

- Oke, E. K., Idowu, M. A., Sobukola, O. P., Adeyeye, S. A. O., & Akinsola, A. O. (2018). Frying of Food: A Critical Review. *Journal of Culinary Science & Technology*, 16(2), 107-127. <https://doi.org/10.1080/15428052.2017.1333936>
- Papa. (s. f.). Recuperado 6 de enero de 2022, de <https://www.midagri.gob.pe/portal/25-sector-agrario/papa/207-papa>
- Parada, J., & Aguilera, J. m. (2007). Food Microstructure Affects the Bioavailability of Several Nutrients. *Journal of Food Science*, 72(2), R21-R32. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00274.x>
- Pedreschi, F. (2009). Chapter 11—Fried and Dehydrated Potato Products. En J. Singh & L. Kaur (Eds.), *Advances in Potato Chemistry and Technology* (pp. 319-337). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374349-7.00011-8>
- Pedreschi, F. (2012). Frying of Potatoes: Physical, Chemical, and Microstructural Changes. *Drying Technology*, 30(7), 707-725. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.663845>
- Pedreschi, F., Aguilera, J. m., & Pyle, L. (2001). Textural Characterization and Kinetics of Potato Strips During Frying. *Journal of Food Science*, 66(2), 314-318. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb11338.x>
- Pedreschi, F., Mery, D., & Marique, T. (2016). Chapter 22—Quality Evaluation and Control of Potato Chips. En D.-W. Sun (Ed.), *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation (Second Edition)* (pp. 591-613). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00022-0>

- Pérez-López, A. J., Noguera-Artiaga, L., López-Miranda González, S., Gómez-San Miguel, P., Ferrández, B., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2021). Acrylamide content in French fries prepared with vegetable oils enriched with β -cyclodextrin or β -cyclodextrin-carvacrol complexes. *LWT*, 148, 111765. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111765>
- Pieczywek, P. M., & Zdunek, A. (2012). Automatic classification of cells and intercellular spaces of apple tissue. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.11.006>
- Pinthus, E. J., Weinberg, P., & Saguy, I. S. (1993). Criterion for Oil Uptake during Deep-fat Frying. *Journal of Food Science*, 58(1), 204-205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb03245.x>
- Pinthus, E. j., Weinberg, P., & Saguy, I. S. (1995). Deep-Fat Fried Potato Product Oil Uptake as Affected by Crust Physical Properties. *Journal of Food Science*, 60(4), 770-772. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb06225.x>
- Rahman, M. M., Gu, Y. T., & Karim, M. A. (2018). Development of realistic food microstructure considering the structural heterogeneity of cells and intercellular space. *Food Structure*, 15, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.01.002>
- Ramos, I., Brandao, T., & Silva, L. (2003). Structural changes during air drying of fruits and vegetables. *Food Science and Technology International*, 2(5), 549-557.
- Rani, M., & Chauhan, G. S. (1995). Effect of intermittent frying and frying medium on the quality of potato chips. *Food Chemistry*, 54(4), 365-368. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00019-F](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00019-F)

- Reinheimer, M. A. (2012). Diseño conceptual de procesos en Ingeniería de Alimentos. Incorporación de la microestructura en el análisis. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/handle/11185/344>
- Rivas, T., Matías, J. M., Taboada, J., & Ordóñez, C. (2011). Functional experiment design for the analysis of colour changes in granite using new L*a*b* functional colour coordinates. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235(16), 4701-4716. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2010.08.005>
- Rosales, R. O. G., Espinosa, J. A., & Bonierbale, M. (2007). UNICA: Variedad Peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y resistencia para condiciones climáticas adversas. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14(1), 41-50.
- Saleem, M., Ahmad, N., Ullah, R., Ali, Z., Mahmood, S., & Ali, H. (2020). Raman Spectroscopy–Based Characterization of Canola Oil. *Food Analytical Methods*, 13(6), 1292-1303. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01752-0>
- Sanchez, P. D. C., Hashim, N., Shamsudin, R., & Mohd Nor, M. Z. (2020). Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.027>
- Schmitt, R. (2017). Scanning Electron Microscope. En The International Academy for Produ, L. Laperrière, & G. Reinhart (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* (pp. 1-5). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_6595-4

- Sharma, S., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2020). Chapter 21—Potato. En A. K. Jaiswal (Ed.), *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables* (pp. 339-347). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00021-0>
- Singh, N., Kaur, L., Ezekiel, R., & Singh Guraya, H. (2005). Microstructural, cooking and textural characteristics of potato (*Solanum tuberosum* L) tubers in relation to physicochemical and functional properties of their flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(8), 1275-1284. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2108>
- Tareke, E., Rydberg, P., Karlsson, P., Eriksson, S., & Törnqvist, M. (2002). Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(17), 4998-5006. Scopus. <https://doi.org/10.1021/jf020302f>
- Teruel, M. del R., Gordon, M., Linares, M. B., Garrido, M. D., Ahromrit, A., & Niranjana, K. (2015). A Comparative Study of the Characteristics of French Fries Produced by Deep Fat Frying and Air Frying. *Journal of Food Science*, 80(2), E349-E358. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12753>
- Tester, R. F., Qi, X., & Karkalas, J. (2006). Hydrolysis of native starches with amylases. *Animal Feed Science and Technology*, 130(1), 39-54. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.01.016>
- Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT - Food Science and Technology*, 42(6), 1164-1173. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.01.008>

- van der Sman, R. G. M., Vollebregt, H. M., Meinders, M. B. J., & Beri, A. (2018). Effects of filler ingredients on the structure and texture of starchy, extruded snacks. *Food Structure*, 18, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.10.001>
- van Koerten, K. N., Schutyser, M. A. I., Somsen, D., & Boom, R. M. (2015a). A pore inactivation model for describing oil uptake of French fries during pre-frying. *Journal of Food Engineering*, 146, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.09.010>
- van Koerten, K. N., Schutyser, M. A. I., Somsen, D., & Boom, R. M. (2015b). Crust morphology and crispness development during deep-fat frying of potato. *Food Research International*, 78, 336-342. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.022>
- Vauvre, J.-M., Kesteloot, R., Patsioura, A., & Vitrac, O. (2014). Microscopic oil uptake mechanisms in fried products*. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 116(6), 741-755. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201300278>
- Vitrac, O., Trystram, G., & Raoult-Wack, A.-L. (2000). Deep-fat frying of food: Heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102(8-9), 529-538. [https://doi.org/10.1002/1438-9312\(200009\)102:8/9<529::AID-EJLT529>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1438-9312(200009)102:8/9<529::AID-EJLT529>3.0.CO;2-F)
- Wang, C., Shi, G., Que, F., Xia, Y., Li, X., Yang, H., Shi, L., Wu, W., Ding, A., Li, X., Qiao, Y., Liao, L., Kang, J., Wang, L., Wang, L., & Xiong, G. (2022). Effect of microstructure and chemical proximate composition on mechanical properties of *Procambarus clarkii* shell. *LWT*

- *Food Science and Technology*, 165, 113731.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113731>

- Yamsaengsung, R., & Moreira, R. G. (2002). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying: Part II: model solution & validation. *Journal of Food Engineering*, 53(1), 11-25.
[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00135-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00135-2)
- Yang, D., Wu, G., Li, P., Zhang, H., & Qi, X. (2019). Comparative analysis of the oil absorption behavior and microstructural changes of fresh and pre-frozen potato strips during frying via MRI, SEM, and XRD. *Food Research International*, 122, 295-302.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.024>
- Zhao, X., Wang, X., Li, X., Zeng, L., Huang, J., Huang, Q., & Zhang, B. (2022). Effect of oil modification on the multiscale structure and gelatinization properties of crosslinked starch and their relationship with the texture and microstructure of surimi/starch composite gels. *Food Chemistry*, 391, 133236. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133236>
- Zheng, T., & Moreira, R. G. (2020). Magnesium ion impregnation in potato slices to improve cell integrity and reduce oil absorption in potato chips during frying. *Heliyon*, 6(12), e05834.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05834>
- Zhou, Z., Nasr, P., Sultani, A., Goff, H. D., Corradini, M. G., Joye, I. J., & Rogers, M. A. (2022). Sliced versus formulated potato chips – Does food structure alter lipid digestion? *Food Structure*, 32, 100272.
<https://doi.org/10.1016/j.foostr.2022.100272>

- Zhu, F., & Hao, C. (2019). Physicochemical properties of Maori potato starch affected by molecular structure. *Food Hydrocolloids*, 90, 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.12.021>
- Ziaifar, A. M., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I., & Trystram, G. (2008). Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(8), 1410-1423. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01664.x>
- Ziaifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity Development and Its Effect on Oil Uptake During Frying Process. *Journal of Food Process Engineering*, 33(2), 191-212. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00267.x>

Apéndice 1. Código de Matlab para determinación de parámetros microestructurales

```
=====
% GUIDE PARA EL PROCESAMIENTO DE MICROGRAFIAS
=====

% PREPARACION DE GUI RESTAURACIÓN
function varargout = Restauracion(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Restauracion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Restauracion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
end

% EJECUCION ANTES DE MOSTRAR EL GUI
function Restauracion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
%declaracion de variables globales
global datproc parametros
%imC a imgasegmentar
    datproc.imgasegm = imcomplement(im2bw(datproc.imC));
    parametros.Ext_img=size(datproc.imgasegm);
%Muestra la imgasegm en el axe
    axes(handles.axes1); axis off;
    imshow(datproc.imgasegm);
    title('Imagen a segmentar'); % imC
%Calcula propiedades de imgasegm
    [datproc.L, parametros.Ne]=bwlabel(datproc.imgasegm);
    prop =regionprops(datproc.L, 'Area');
%Busca y muestra area minima y area maxima
    areas=[prop.Area];
    areamax =max(areas);
    areamin=min(areas);
    set(handles.txtareamin,'String', areamin);
    set(handles.txtareamax,'String', areamax);
%Cargando imagen en imgenuso
    datproc.imgenuso = datproc.imgasegm;
%Salida al handles de hObject
handles.output = hObject;
%Actualizando estructura
guidata(hObject, handles);
end
```

```

%Las salidas se muestran en la linea de comandos
function varargout = Restauracion_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
end

```

```

=====
% Programación de controles
%
=====

```

```

% EJECUCIÓN DEL PROCESO DE ESQUELETIZADO
function esqueletizar_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

global datproc
%Esqueletiza imgasegmentar y muestra resultado
    datproc.imgesquel = bwmorph(datproc.imgenuso, 'skel', Inf);
    datproc.imgesquel = bwmorph(datproc.imgesquel, 'spur', Inf);
    datproc.imgenuso = datproc.imgesquel;
    imshow(datproc.imgenuso)
%Etiqueta y determina propiedades de imagen esqueletizada
    datproc.L=bwlabel(datproc.imgenuso);
    prop =regionprops(datproc.L);
    areas=[prop.Area];
    areamax =max(areas);
    areamin=min(areas);
    set(handles.txtareamin,'String', areamin);
    set(handles.txtareamax,'String', areamax);
%Actualizando estructura
guidata(hObject, handles);
end

```

```

%SELECCIONAR EL TAMAÑO DE HUECO
function sldhueco_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

%Declaracion de variables globales
global datproc parametros
%Muestra tamaño minimo de los huecos
    dimhueco = get(hObject, 'Value');
    set (handles.txthuecos, 'String', fix(dimhueco));
%Borra los huecos
    datproc.imgborrada = bwareaopen (datproc.imgenuso, dimhueco);%imagen normal
    datproc.imgborrada= ~datproc.imgborrada;%imagen negativa
    datproc.imgborrada = bwareaopen (datproc.imgborrada, dimhueco);
    datproc.imgenuso= ~datproc.imgborrada;%imagen positiva
%Muestra y titula imagen borrada
    imshow(datproc.imgenuso);
    title('Imagen restando huecos');
%Etiqueta y calcula propiedades imgborrada
    [datproc.L, parametros.Ne]=bwlabel(datproc.imgenuso);
    prop =regionprops(datproc.L,'Area');
%Busca y muestra area minima y area maxima
    areas=[prop.Area];
    areamax =max(areas);
    areamin=min(areas);
    set(handles.txtareamin,'String', areamin);
    set(handles.txtareamax,'String', areamax);
% actualiza estructura

```

```

guidata(hObject, handles);
end

% DILATACION DE LA IMAGEN
function dilatar_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Declaracion de funciones globales
global datproc
%Estructura para dilatacion
estructura = [0 1 0 ; 1 1 1; 0 1 0];
%Realiza dilatacion
datproc.imgdil= imdilate (datproc.imgenuso, estructura);
%Guarda, muestra y titula la imagen dilatada
datproc.imgenuso= datproc.imgdil;
datproc.img_entren=datproc.imgdil;
imshow(datproc.imgenuso);
title(strcat ('Imagen dilatada'));
%Etiqueta imagen dilatada y determina propiedades
datproc.L=bwlabel(datproc.imgenuso);
prop =regionprops(datproc.L,'Area');
areas=[prop.Area];
areamax =max(areas);
areamin=min(areas);
%Mostrando area minima y area maxima
set(handles.txtareamin,'String', areamin);
set(handles.txtareamax,'String', areamax);
%Actualizando estructura
guidata(hObject, handles);
end

%EJECUCIÓN DE LA SEGMENTACION
function segmentar_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Declaracion de variables globales
global datproc parametros
%Etiqueta y determina propiedades de imgasegmentar
[datproc.L, parametros.Ne]=bwlabel(~datproc.imgenuso);
parametros.stats =regionprops(datproc.L,'all'); %obtiene todos los datos de los elementos de
L
datproc.imgsegm = datproc.L;
%creando matriz de valores extremos
EX=zeros(2,2);
parametros.Clasifica=[ones(parametros.Ne,2) zeros(parametros.Ne,2)];
% 1 = elemento [ 0 - 1]
% 2 = seleccionado o no [0 1]
% 3 = celulas(1) o espacio (2)
parametros.centroides=zeros(parametros.Ne,2);
%limites de los elementos
for i=1:parametros.Ne
% guarda el numero del elemento
parametros.Clasifica(i,1)=i;
%comparación con los limites
Extremos=parametros.stats(i).Extrema; %extremos del elemento
for j=1:2 % 1= columnas - 2= filas
EX(1,j)=min(Extremos(:,j));
EX(2,j)=max(Extremos(:,j));
end
end

```

```

    if EX(1,1)<=parametros.Ext_img(2)*0.02 || EX(2,1)>= parametros.Ext_img(2)*0.98 ||
EX(1,2)<= parametros.Ext_img(1)*0.02 || EX(2,2)>= parametros.Ext_img(1)*0.98
        parametros.Clasifica(i,2)=0;
    end
    % Captar centroides
    parametros.centroides(i,:)=parametros.stats(i,1).Centroid;
end
% volver blanco los elementos no analizables
[f, c]=find(parametros.Clasifica(:,2)==0); % las filas indicab que elementos volver cero
for i=1:length(f)
    [nf, nc]=find(datproc.L==f(i));
    for j=1:length(nf)
        datproc.L(nf(j),nc(j))=0;
    end
end
end
%Muestra imagen etiquetada, diferencia elementos con diferentes colores
imshow (label2rgb(datproc.L));
title ('Each color corresponds to a segmented element')
% Actualizando la estructura
guidata (hObject, handles);
end

```

%EJECUCION DE CLASIFICACION POR RED NEURONAL

```

function usarrna_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Declaracion de variables globales
global datproc stats ix ix1 datainput elembase parametros
global data_cel data_esp data_nr
% Cargando la escala y cargando normalizador
load defEscala;
load normalizador;
% Extraer informacion de cada elemento
[f, c]=find(parametros.Clasifica(:,2)==1);
psim=zeros (length(f),8);
for i=1:length(f)
    psim(i,1)=parametros.stats(f(i)).Area;
    psim(i,2)=parametros.stats(f(i)).EquivDiameter;
    psim(i,3)=parametros.stats(f(i)).MajorAxisLength;
    psim(i,4)=parametros.stats(f(i)).MinorAxisLength;
    psim(i,5)=parametros.stats(f(i)).Perimeter;

    psim(i,6)=4*3.1416*parametros.stats(f(i)).Area/parametros.stats(f(i)).Perimeter;
end
end

```

%Ejecución del control centrosmasa

```

function centrosmasa_Callback(hObject, eventdata, handles)
global datproc sit
% =====
if sit ==0
    s = regionprops(datproc.L, 'centroid');
    centroids = cat(1, s.Centroid);
    imshow(label2rgb(datproc.L))
    hold on
    plot(centroids(:,1), centroids(:,2), 'r*')
    hold off
    sit=1;
end

```



```

    save s centroids
else
    sit=0;
    cla
    imshow(label2rgb(datproc.L))
end

end

%Ejecución al mover el sldNumElem muestra el codigo de cada segmento
function sldNumElem_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Declaracion de variables globales
global stats datproc ix objselec
%=====
objselec = fix(get(hObject, 'Value'));

hold on%Fija el axe
    cla %Limpia el axe
    imshow(label2rgb(datproc.imgetiq)); %Muestra la imgetiq y guarda en variable datproc
    rectangle('Position',stats(objselec).BoundingBox,'EdgeColor','r','LineWidth',2)%Muestra el
rectangulo contenedor
    stats(objselec).BoundingBox
    X=stats(objselec).Extrema
    % figure;
    % plot(X(:,1),X(:,2))
    %save stats stats
hold off

%Muestra el tipo de elemento en los option buttons y en el cuadro de texto
switch ix(objselec);
    case 1
        set(handles.optCel,'Value',1);
        set(handles.optespint,'Value',0);
        set(handles.optelnorec,'Value',0);
        texto = strcat ('1','-','0','-','0');
    case 2
        set(handles.optCel,'Value',0);
        set(handles.optespint,'Value',1);
        set(handles.optelnorec,'Value',0);
        texto = strcat ('0','-','1','-','0');
    case 3
        set(handles.optCel,'Value',0);
        set(handles.optespint,'Value',0);
        set(handles.optelnorec,'Value',1);
        texto = strcat ('0','-','0','-','1');
end
    set(handles.txtcodigo,'String',texto);
end

%Cambios al seleccionar cada option button
function uipanel7_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
%Declaracion de variables globales
global datproc objselec ix1 stats datainput data_cel data_esp data_nr ix
global Nc1 Nc2 Nc3 Ne1 Ne2 Ne3 Nnr1 Nnr2 Nnr3

```

```
global PNC1 PNC2 PNC3 PNe1 PNe2 PNe3 PNnr1 PNnr2 PNnr3
```

```
%=====
```

```
%Seleccion de tipo elemento al seleccionar los option buttons
```

```
if hObject ==handles.optCel
    set(handles.optCel,'Value',1);
    set(handles.optespint,'Value',0);
    set(handles.optelnorec,'Value',0);
    ix1(objselec)=1;
    texto = strcat ('1','-','0','-','0');
elseif hObject ==handles.optespint
    set(handles.optCel,'Value',0);
    set(handles.optespint,'Value',1);
    set(handles.optelnorec,'Value',0);
    ix1(objselec)=2;
    texto = strcat ('0','-','1','-','0');
elseif hObject ==handles.optelnorec
    set(handles.optCel,'Value',0);
    set(handles.optespint,'Value',0);
    set(handles.optelnorec,'Value',1);
    ix1(objselec)=3;
    texto = strcat ('0','-','0','-','1');
end
```

```
%Muestra el codigo del elemento en el txtcodigo
```

```
set(handles.txtcodigo,'String',texto);
```

```
%Recolorea y muestra la imagen
```

```
[nfil, ncol]=size(datproc.L);
for k=1:nfil
    for j=1:ncol
        if datproc.L(k,j)~= 0;
            imgetiq(k,j) =ix1(datproc.L(k,j));
        end
    end
end
```

```
%colorea de blanco los elementos no reconocibles
```

```
[nfil ncol]=size(imgetiq);
for k=1:nfil
    for j=1:ncol
        if imgetiq(k,j)== 3;
            imgetiq(k,j)= 0;
        end
    end
end
```

```
datproc.imgetiq = imgetiq;
```

```
hold on%fija el axe
```

```
cla %limpia el axe
```

```
imshow(label2rgb(datproc.imgetiq)); %muestra la imgetiq y guarda en variable datproc
```

```

    rectangle('Position',stats(objselec).BoundingBox,'EdgeColor','r','LineWidth',2)% muestra el
    rectangulo contenedor
    hold off

```

```

%borra las variables secundarias y setea a cero m, n y p
clear data_cel;clear data_esp;clear data_nr;
n=0; m=0; p=0;

```

```

for i=1:1:datproc.Ne
    switch ix1(i)
        case 1;
            n=n+1;
            data_cel(n,:)=datainput(i,:);
        case 2;
            m=m+1;
            data_esp(m,:)=datainput(i,:);
        case 3;
            p=p+1;
            data_nr(p,:)=datainput(i,:);
    end
end

```

```

%Pasando la informacion a la estructura datproc
datproc.data_cel = data_cel;
datproc.data_esp = data_esp;
datproc.data_nr= data_nr;

```

```

Nc1=0; Ne1=0; Nnr1=0;
Nc2=0; Ne2=0; Nnr2=0;
Nc3=0; Ne3=0; Nnr3=0;

```

```

%Secuencia para mostrar el error de la red

```

```

for i=1:1:datproc.Ne
    switch ix1(i)
        case 1; %Caso celulas
            if ix(i)==1;
                Nc1=Nc1+1;
            elseif ix(i)== 2;
                Nc2=Nc2+1;
            else
                Nc3=Nc3+1;
            end
        case 2;%Caso espacios
            if ix(i)==2;
                Ne2=Ne2+1;
            elseif ix(i)== 1;
                Ne1=Ne1+1;
            else
                Ne3=Ne3+1;
            end
        case 3;%Caso no reconocibles
            if ix(i)==3;
                Nnr3=Nnr3+1;
            elseif ix(i)==2;
                Nnr2=Nnr2+1;
            end
    end
end

```

```

        else
            Nnr1=Nnr1+1;
        end
    end
end

%Calculo de errores
PNc1=100*(Nc1/n); PNc2=100*(Nc2/n); PNc3=100*(Nc3/n);
PNe1 = 100*(Ne1/m);PNe2 = 100*(Ne2/m);PNe3 = 100*(Ne3/m);
PNnr1 = 100*(Nnr1/p);PNnr2 = 100*(Nnr2/p);PNnr3 = 100*(Nnr3/p);
PP = PNc1*(n/(n+m+p))+ PNe2*(m/(n+m+p))+ PNnr3*(p/(n+m+p));

%Llenado de la matriz de confusion
set(handles.txt11,'String',num2str(PNc1,3));
set(handles.txt12,'String',num2str(PNc2,3));
set(handles.txt13,'String',num2str(PNc3,3));

set(handles.txt21,'String',num2str(PNe1,3));
set(handles.txt22,'String',num2str(PNe2,3));
set(handles.txt23,'String',num2str(PNe3,3));

set(handles.txt31,'String',num2str(PNnr1,3));
set(handles.txt32,'String',num2str(PNnr2,3));
set(handles.txt33,'String',num2str(PNnr3,3));

set (handles.txtPP, 'String', num2str(PP,3))%error promedio

%Graba cambios en estructura datproc
save datproc datproc
end

%Actualiza base de datos con nueva inf de selección
function actualizarBD_Callback(hObject, eventdata, handles)
global datproc datainput ix1 elembase
%=====
%Almacena informacion de los elementos etiquetados
data = zeros (datproc.Ne,20);
for i=1:1:datproc.Ne
    data(i,1:17)=datainput(i,:);
    switch ix1(i)
        case 1;
            data(i,18)=1;
            data(i,19)=0;
            data(i,20)=0;
        case 2;
            data(i,18)=0;
            data(i,19)=1;
            data(i,20)=0;
        case 3;
            data(i,18)=0;
            data(i,19)=0;
            data(i,20)=1;
    end
end
end

```

```

%Reenumera los elementos y guarda data en datproc
cantidad=datproc.Ne+elembase;n=0;
for i=elembase+1:cantidad
    n=n+1;orden(n)=i;
end

for i=1:datproc.Ne
    data(i,1)=orden(i);
end
datproc.data= data;
save datproc datproc

%Almacena la informacion en la hoja excel data, sumandola a la ya existente
pos = elembase + 2;
posicion =strcat('A',mat2str(pos));
xlswrite('data.xlsx', data, 'data', posicion);
end

%Ejecución del control archivo
function archivo_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Actualizando estructura
guidata(hObject, handles);
end

%Ejecucion del control grabar
function grabar_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Declaracion de variables globales
global datproc
save datproc datproc

%Actualizando estructura
guidata(hObject, handles);
end

%Ejecución del control salir
function salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Cierra el guide y abre el ProcImagen6
close (Restauracion)
ProcImagen6
end

%Llama al guide analisisestad y muestra la analisisestad de cada elemento
function analisisestad_Callback(hObject, eventdata, handles)
Estadistica %Apertura del guide estadistica
end

%Ejecucion del control clasificación, solo muestra las opciones
function clasificacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
end

% Esta funcion abre al guide data entrenamiento
function dataentrenamiento_Callback(hObject, eventdata, handles)
DataEntrenamiento %Apertura de guide data de entrenamiento
end

```

```

%esta funcion habilita la opcion de refinar analisis clasificación
function refinar analisis_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Declaracion de variables globales
global datproc
%=====
%Hace visible o invisible el panel de refinacion
visible = cellstr(get(handles.uipanel7,'Visible'));
if strcmp(visible,'off')
    set (handles.uipanel7,'Visible','on');
    set (handles.uipanel10,'Visible','on');
else
    set (handles.uipanel7,'Visible','off');
    set (handles.uipanel10,'Visible','off');
end

%Determina el minimo y maximo de la barra de desplazamiento, con el valor
%de datproc.Ne
x=1/datproc.Ne; y=10/datproc.Ne;
set (handles.sldNumElem,'Min',1);
set (handles.sldNumElem,'Max',datproc.Ne);
set (handles.sldNumElem,'SliderStep',[x y]);
set (handles.sldNumElem,'Value',1);

end

```

Apéndice 2. Imágenes generadas en software de procesamiento de micrografías

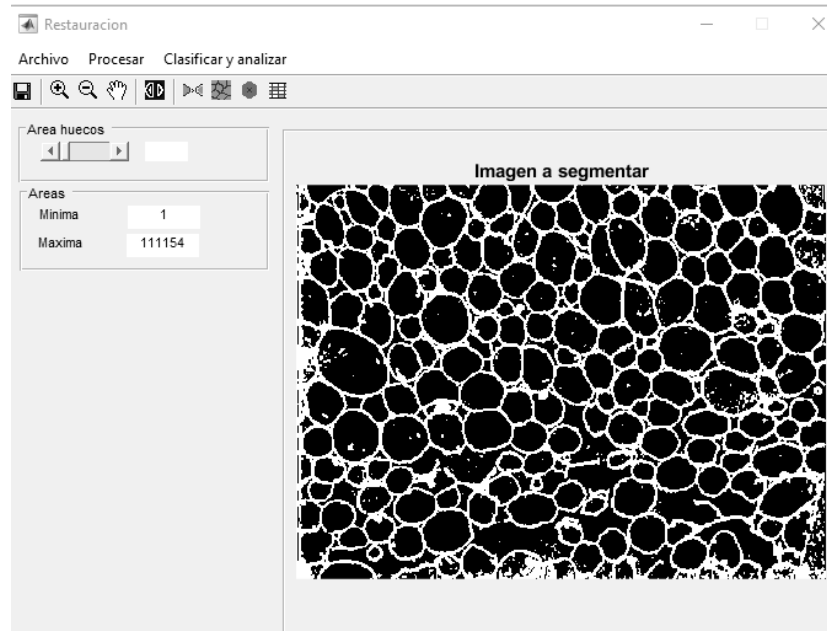


Figura 40. Módulo de análisis de células

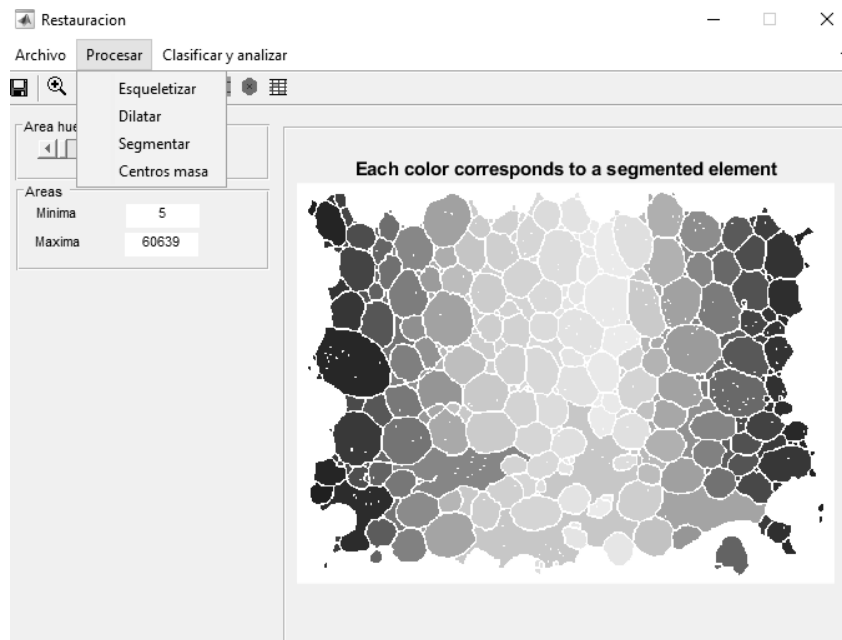


Figura 41. Modulo donde muestra las opciones de procesado de imagen

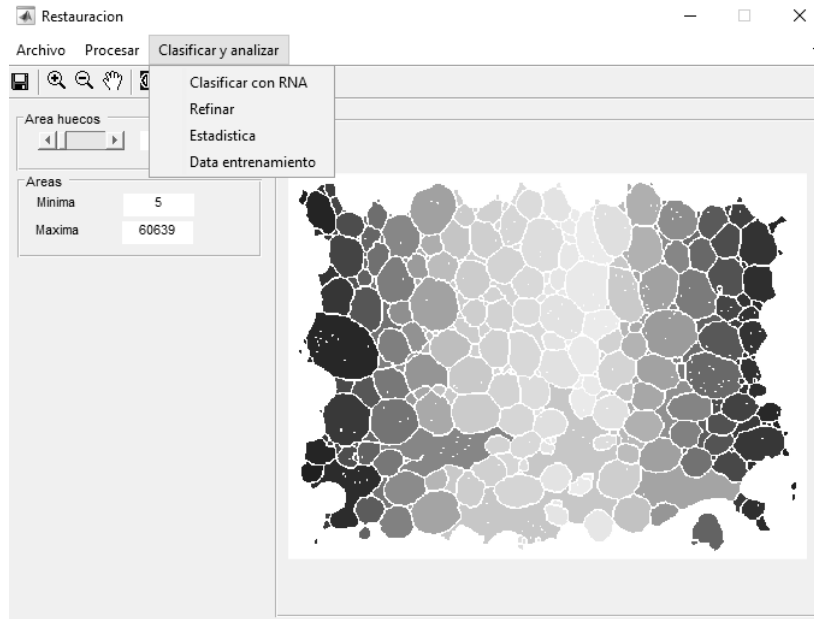


Figura 42. Módulo donde muestra las opciones de clasificación y análisis

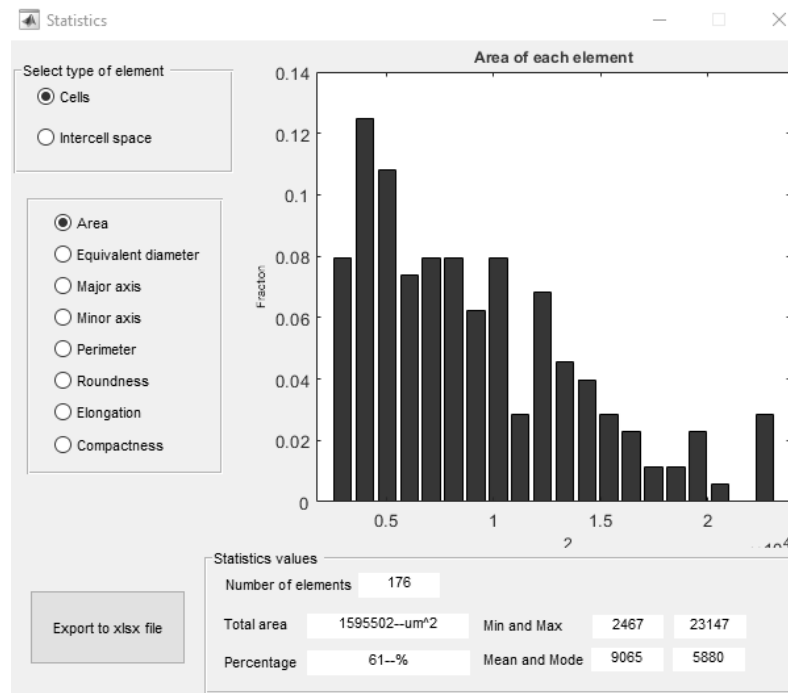


Figura 43. Módulo donde genera los parámetros microestructurales